



## 저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학박사 학위논문

전력 시장에서 수요 반응에 의한  
시장지배력 완화에 관한 연구

A Study on Market Power Mitigation by  
Demand Response in Electricity Market

2015 년 8 월

서울대학교 대학원

전기컴퓨터공학부

유태현

## 초 록

지난 20 여 년 동안 전력 산업에서는 시장 경쟁 도입을 통해 효율성을 향상시키려는 노력이 이루어져 왔으며, 상당부분 성과를 이루었다. 그러나 전력 산업에서의 발전 부분은 과점의 형태를 띌 수 있으며, 이에 따른 발전사업자의 시장 지배력 행사는 경쟁 도입의 효과를 약화시키는 원인이 되어 왔다. 이에 발전 사업자의 시장 지배력 행사를 억제하기 위한 여러 가지 수단이 도입되어 왔다. 그 중 하나인 수요 반응은 발전 사업자의 시장 지배력을 완화할 수 있는 수단으로 주목 받고 있다.

본 논문에서는 발전 회사들의 전력 시장 하에서의 시장 지배력 행사를 인센티브를 제공하여 수요 반응을 통해 완화시키는 방법에 대해 알아보았다. 자율적 풀 형태의 전력 시장 하에서, 각 시장 참여자들의 전략 행위에 의한 시장 균형을 게임 이론적 접근을 통하여 분석하였다. 발전 회사와 소비자들의 이윤함수를 구성하고, 가격 결정자들의 이윤최대화 조건인 최적 반응 함수를 유도하여, 시장 균형을 도출하고, 이에 대해 분석하였다. 전일 에너지 시장에서의 균형은 가격결정자들의 발전량 또는 수요 절감량을 통한 경쟁을 다룰 수 있는 쿠르노 모형을 통해 도출하였다. 자율적 수요 반응 참여에서도 발생할 수 있는 발전 회사의 시장지배력의 행사에 의한 시장 가격 상승 및 잉여의 불공정한 분배를 더욱 개선하기 위하여, 가격 수용자로 행동하는 소비자가 가격

결정자로 행동하는 소비자에게 수요 절감에 따른 인센티브를 제공하게 하여, 그 수준을 시장 개설 이전에 공표하는 선행 전략으로서의 수요 자원 이용 방법을 연구하였다. 본 방법은 사전에 인센티브가 공표되는 수요 반응 프로그램의 특성에 고려하여, 적정 인센티브 수준이 후행 참여자들의 전략에 영향을 미칠 수 있다는 점에 착안하였다. 이를 순차 게임인 슈타켈버그 모형을 통해 참여자들의 행태를 분석하고 균형점을 도출하는 방법에 대해 간단한 참여자 구성에서 해석적인 해를 유도해내었다.

하지만, 가격 결정자로 행동하는 참여자가 늘어날 경우, 해석적인 방법을 통한 분석이 힘들기 때문에, 사례 연구에서는 인센티브 사전 공표 상황, 자율적 수요 반응 참여 상황, 과점 상황, 이상적인 완전 경쟁 상황에서의 시장 균형 값과 그에 따른 잉여들을 비교 분석하였다. 인센티브를 사전 공표하는 수요 반응 상황에서는, 시장 가격의 하락 및 플레이어들에게 과점에서의 후생 분배보다 좀더 공정한 사회 후생 분배를 이루었고 이로 인하여 시장지배력을 완화시키는 결과를 가져오게 되었다.

**주요어 :** 수요 반응, 시장 지배력, 전력 시장, 쿠르노 모형, 슈타켈버그 모형

**학 번 :** 2009-30199

# 목 차

제 1 장 서론.....	1
1.1 연구의 배경 및 목적.....	1
1.2 논문의 개요 및 구성.....	7
제 2 장 전력 시장의 구조.....	9
2.1 전력 시장의 구조.....	9
2.2 본 논문에서 가정하는 시장 구조.....	16
제 3 장 수요 반응과 게임 이론.....	18
3.1 수요 반응의 분류.....	18
3.2 수요 반응의 사회 후생에 대한 영향.....	23
3.3 게임 이론적 접근을 통한 시장 균형.....	26
3.3.1 쿠르노 게임과 전력 시장에서의 균형.....	29
3.3.2 슈타켈버그 게임과 전력 시장에서의 균형.....	31
제 4 장 상황 별 전력 시장의 균형 모델링.....	36
4.1 완전 경쟁 상황에서의 전력 시장의 균형.....	38
4.2 과점 상황에서의 전력 시장의 균형.....	41
4.3 자율적 수요반응참여를 포함한 상황에서의 균형.....	45
4.4 인센티브 공표가 우선되는 수요 반응을 포함한 상황의 균형.....	63
4.4.1 인센티브 사전 공표 효과 적용 방법의 개요.....	63
4.4.2 대상 참여자들의 이윤함수.....	71
4.4.3 참여자들의 이윤 최대화 조건과 시장균형 도출.....	75

제 5 장 사례 연구.....	90
5.1 확장된 발전 및 수요 구성 하에서의 시장 균형 .....	92
5.1.1 완전 경쟁 시나리오에서의 시장 균형 결과 .....	95
5.1.2 과점 상황 시나리오에서의 시장 균형 결과 .....	96
5.1.3 자율적 수요반응을 포함한 상황에서의 시장 균형 결과 .....	99
5.1.4 인센티브를 사전 공표하는 시나리오에서 시장 균형 결과 .....	103
5.1.5 시장 지배력 행사 정도의 평가 .....	109
5.2 소비자의 전력에 대한 효용 변화에 따른 시나리오 별 시장 균형 결과 .....	119
5.2.1 기율기 변화에 따른 시장 균형 결과 값에 대한 분석 .....	120
5.2.2 시장 지배력 측정 지수를 통한 분석 .....	130
5.3 실 사례 적용을 위한 사례 연구 .....	138
제 6 장 결론 .....	144
참고 문헌 .....	150
APPENDIX .....	156
A.1 본 논문에서 나타난 사회 후생 감소에 대한 분석 .....	156
A.2 ESS(Energy Storage System) 및 보조발전기의 연계 고려 .....	158
A.3 본 분석 방법 적용에서의 전력 수요 자원 재화와 일반 재화의 차이성 .....	161
A.4 수요 반응 참여 소비자 잉여 비율 ( $k$ )의 변화에 따른 시장 지배력 완화 효과 .....	163
Abstract .....	170

## 그림 목차

그림 2.1 영국 NETA 시기의 시장 참여자 사이의 관계도.....	11
그림 2.2 풀 모델과 쌍무 계약 모델의 개념적인 표현.....	13
그림 2.3 전력 시장 구조 별 시장 및 계통 운영 과정.....	14
그림 3.1 보상 지급 방식에 따른 수요 반응 프로그램의 분류 .....	22
그림 3.2 수요 반응의 사회 후생에 대한 영향 .....	24
그림 3.3 쿠르노 게임의 균형점 그래프 .....	30
그림 3.4 슈타켈버그 게임의 균형점 그래프 .....	33
그림 4.1 자율적 수요 반응 참여에 따른 소비자 잉여의 손실분 ..	48
그림 4.2 발전 회사의 전략 입찰로 인한 시장 균형의 변화.....	64
그림 4.3 수요 반응 참여에 의한 영향을 고려한 시장 균형의 변화 .....	65
그림 4.4 인센티브 사전 공표를 포함한 전력 시장의 흐름도.....	68
그림 4.5 인센티브 사전 공표 효과를 고려한 시장 균형 점의 변화 .....	69
그림 4.6 시장 청산의 흐름과 해를 구하기 위한 역진 귀납과정 ..	76
그림 5.1 기율기의 변화에 따른 시나리오 별 사회 후생의 변화 .....	121
그림 5.2 기율기 변화에 따른 시나리오 별 시장 가격의 변화...	123
그림 5.3 기율기 변화에 따른 시나리오 별 완전경쟁 대비 생산자 잉여 증가 .....	125
그림 5.4 기율기 변화에 따른 시나리오 별 완전경쟁 대비 소비자 잉여 감소 .....	126

그림 5.5 기온기 변화에 따른 시나리오 별 수요 반응 량의 변화 .....	127
그림 5.6 기온기 변화에 따른 인센티브 사전공표 수요반응의 인센티브 수준 및 시장 가격 감소분의 변화 .....	128
그림 5.7 기온기 변화에 따른 시나리오 별 러너지수 .....	130
그림 5.8 기온기 변화에 따른 시나리오 별 CSDI.....	131
그림 5.9 기온기 변화에 따른 시나리오 별 PSDI.....	133
그림 5.10 완전 경쟁 시나리오에서의 소비자 잉여 및 생산자 잉여의 백분율 .....	134
그림 5.11 과점 상황 시나리오에서의 소비자 잉여 및 생산자 잉여의 백분율 .....	135
그림 5.12 자율적 수요반응 참여 시나리오에서의 소비자 잉여 및 생산자 잉여의 백분율 .....	135
그림 5.13 인센티브 사전공표 시나리오에서 소비자 잉여 및 생산자 잉여의 백분율.....	136
그림 A.1 현실에서의 비탄력적 수요 곡선과 수요 반응에 의한 후생 증가.....	156
그림 A.2 Grid, 에너지저장장치, 부하, 그리고 신재생에너지 사이의 관계도.....	159
그림 A.3 생산 보조금과 반응곡선의 이동 .....	162
그림 A.4.1 수요반응참여 소비자의 잉여 비율 변화에 따른 러너지수의 변화 .....	165



그림 A.4.2 수요반응참여소비자의 잉여 비율 변화에 따른 PSDI의 변화 .....	166
그림 A.4.3 수요반응참여소비자의 잉여 비율 변화에 따른 CSDI 의 변화.....	168

## 표 목차

표 5.1	상정 시나리오들의 구분 및 설명 .....	90
표 5.2	사례 연구에 이용된 발전기들의 정보 .....	93
표 5.3	역수요 함수의 정보 .....	94
표 5.4	완전 경쟁 시나리오 시장 균형 결과 .....	95
표 5.5	과점 상황에서의 시장 균형 결과 .....	97
표 5.6	자율적 수요 반응을 포함한 상황에서의 시장 균형 결과 .....	100
표 5.7	인센티브의 사전공표 시나리오에서의 시장 균형 결과...	105
표 5.8	과점 상황에서의 PSDI .....	113
표 5.9	자율적 수요반응을 포함한 상황에서의 PSDI .....	113
표 5.10	인센티브의 사전 공표 시나리오에서의 PSDI .....	113
표 5.11	과점 상황에서의 CSDI .....	116
표 5.12	자율적 수요반응을 포함한 상황에서의 CSDI .....	116
표 5.13	인센티브의 사전 공표 시나리오에서의 CSDI .....	116
표 5.14	실 사례 연구에 이용된 발전회사들의 생산비용함수 정보 .....	140
표 5.15	기준 탄력성이 $-0.8$ 일 때의 시장 균형 결과 .....	141
표 5.16	기준 탄력성이 $-0.5$ 일 때의 시장 균형 결과 .....	141
표 5.17	기준 탄력성이 $-0.3$ 일 때의 시장 균형 결과 .....	142
표 5.18	기준 탄력성이 $-0.1$ 일 때의 시장 균형 결과 .....	142

# 제 1장 서론

## 1. 1 연구의 배경 및 목적

전통적으로 전력 시스템 운영은 수요를 비탄력적인 것으로 고려하고, 해당 수요를 만족시키기 위해 발전 자원들을 통해서 급전 계획을 수립하였다 [1]. 이러한 시스템 운영 계획은 미래의 전력 수요를 예측한 후에 해당 수요 값을 만족 시키기 위해 가장 적은 비용의 발전량 구성을 하는 목적을 가지고 있었다[2]. 수요와 공급의 균형은 가장 중요한 업무 중 하나로서 언제나 유지되어야 하며, 시스템에서 확보된 발전 용량의 총합은 언제나 피크 수요를 만족시킬 수 있어야 한다. 그런데 수요는 시시각각 변화하게 되고, 만약 공급이 중단되는 경우, 막대한 비용이 들어가는 특징을 가지고 있으며, 제어 불가능한 것으로 간주되었었다 [3, 4].

1970 년대부터, 시스템 운영에서의 효율 향상, 기존의 발전 자원 이용 및 전력의 송전부분 등에서 생길 수 있는 장점들로 인하여 수요를 비탄력적인 것으로 여기는 것을 넘어 제어 가능한 자원으로 보는 수요 관리(Demand Side Management, DSM) 도입이 주목 받게 되었다. 즉, 발전력을 증가시키는 대신 수요를 감소시키는 방법으로 수급 균형을 도모하게 된 것이다. 수요 관리는 시스템 운영자에 의해 지시되는 형태였으며, 이에 따른 보상은 이벤트가 발령되고 실제로 감소된 부하에

대해서 보상이 지급되는 형태였다. 더욱이, 시장 기반의 운영의 도입과, 전력 회사들에 대한 탈규제화는 소비자들의 전력 사용을 시스템의 운영과 향후 발전 방향에 대해서 가장 중요하게 여기게 되는 계기가 되었다. 하지만, 수요 측의 전력 시장에서의 반응은 Advanced metering 이나 통신, 그리고 제어 방법들과 같은 인프라의 구축이 되지 않은 시장 도입 초기 상황에서는 한계가 있었다 [3].

하지만, AMI(Advanced Metering Infrastructure) 기술이 발달하고 소비자들에게 보급되면서, 전력 도매 시장에 대한 소비자들의 직접적인 참여 가능성이 열리게 되었다[5]. 양방향 통신 가능한 AMI 기술로 인하여 소비자는 도매시장 가격에 자신의 의사를 반영할 수 있게 되었고, 이러한 가격 반응 부하(Price Responsive Demand, PRD)의 출현은 도매 전력 시장 가격 정보를 포함하고 있는 소매 요금의 신규 개발 및 발전을 유도하게 되었다.[6] 이렇게 개발된 신규 프로그램과 더불어 기존의 DSM은 수요 반응(Demand Response, DR)라는 이름으로 새로이 불리게 되었다. 이에, 수요 반응은 도매 시장 가격이 높을 때나 시스템이 위험한 상황에 처했을 때, 전기 사용을 줄이게끔 유도하는 방법으로 정의하게 되었다 [7]. 이에 기반하여 수요 반응 프로그램들은 크게 두 그룹으로 분류할 수 있다. 하나는 기존의 수요관리를 발전시킨 인센티브 기반 수요 반응 프로그램이고 나머지 하나는 가격 기반 수요 반응 프로그램이다[8]. 인센티브 기반 수요 반응 프로그램은 사전 협의된 조건이 만족될 때,

수요 반응 운영 주체(주로 독립계통운영자 또는 Curtailment Service Provider)가 수요 절감 이벤트를 발령함으로써 시행된다. 수요 반응 참여자들은 절감에 따른 인센티브를 지급받으며, 이로 인해 그들이 전력을 소비하면서 얻게 되는 효용보다 높은 이익을 얻게 된다. 가격 기반 DR 프로그램은 시장 가격에 의한 자율적인 부하절감을 기본으로 하고 있으며, 절감시행 여부는 전적으로 소비자에게 달려있는 소매 요금 프로그램이다. 소비자들은 도매 전력 시장의 가격정보를 수집하고 그들의 효용을 최대화 할 수 있는 부하 사용계획을 수립한다. 이러한 가격 반응 부하를 기존의 전력 수급 계획 문제를 푸는데 포함시키기 위하여 많은 연구들이 진행되고 있다. [9]에서는, 경쟁적 전력 시장 하에서 자기탄력성과 교차탄력성을 동시에 고려한 소비자를 모델링하고 이를 통하여 운영계획을 짜는 연구를 진행하였다. 결과로, 발전비용의 감소, 시장 청산 가격의 감소, 잉여의 분배 등이 평가 되었다. 관련된 연구들도 역시 자기 탄력성과 교차 탄력성을 이용해 소비자들을 모델링하고 이를 기존의 스케줄링 문제에 도입하려는 연구를 진행하였다 [10, 11]. 이러한 소비자들의 모델링은 DR 프로그램을 통한 부하절감을 표현하기 위해 주로 연구되어 왔다[12-15]. [16]에서는, PJM, CAISO, ISO-NE, NYISO 등의 계통에서 가격반응부하의 실제 적용이 분석되었고, 이에 따른 시장에서의 수요반응의 효율성이 분석되었다. 이러한 노력들은 사회 후생을 증가시키는 결과를 가져올 수 있었다.

한편, 가격 반응 부하의 도입으로 인해 수요 측에서는 사회 후생 향상에 기여하고 있는데 반해, 발전 측에서는 발전 회사들이 가질 수 있는 시장지배력의 행사 문제로 시장의 비효율을 발생시킬 수 있다[17]. 전력 시스템의 특성 상, 피크 시간대의 발전은 미소 변동만으로도 시장 가격과 수급 균형에 큰 영향을 미치게 된다[18, 19]. 전력 에너지 시장은 재무적 거래 청산과 더불어 물리적 이행의 의무가 존재하는 특수한 시장으로서, 단일 가격에 의한 전력 가격 청산 방식은 시장 가격이 증가할 때, 일부 발전 회사들에게 막대한 이윤을 가져다 줄 수 있다. 이에 따라, 이윤 추구를 목적으로 하는 발전 회사들은 타 재화와 차별되는 전력 시장의 물리적 한계를 통해 그들이 가지고 있는 시장지배력을 행사하게 된다. 그 중에서도, 전력 산업에서 그들이 차지하는 비중을 통하여 전략 행동을 통해 가격을 상승시킴으로써 이익을 시장지배력을 행사할 수 있다[20]. 이는, 전력 시장에서의 신규 자원의 진입 및 퇴장이 어렵다는 특징에 기인 한다. 이러한 특성을 고려하여 발전 회사들의 행태를 분석하기 위한 여러 노력들이 이루어져 왔다. 용량 철회를 고려한 쿠르노 모형의 도입, 가격 입찰을 통한 시장 지배력 행사에 관련한 베르트랑 모형, 그리고 전력 시장에서의 발전기 비용함수의 적용 및 수요의 불확실성을 고려한 SFE(Supply Function Equilibria) 등이 그 분석 방법으로 제시되었다[17, 21-24].

이러한 시장지배력 행사 문제를 해결하기 위해, 시장지배력의 사전적

완화 방법과 사후적 완화 방법들에 대한 연구들이 이루어져 왔다. 그 방법으로는 참여자들의 개별 점유율을 제한하는 방법, 진입 장벽을 낮추어 시장 참여를 유도하는 방법, 송전망을 확충하는 방법, 선도계약을 이용하는 방법, 수요의 시장 참여를 유도하는 방법 등이 있다[17]. 이 중에서도, 수요 반응이라는 개념이 정립되고, 인프라가 갖추어지면서 수요자원의 현실적 이용 가능성이 열림에 따라, 수요 반응을 통한 시장 지배력 행사 완화는 사중손실(Dead-weight loss)을 줄이거나 가격 수준을 낮춤으로서 실현될 수 있다는 것에 관심이 모아졌다[25]. 이와 같은 수요 반응을 통한 시장지배력 완화 효과에 관련된 연구들은 수요의 탄력성이 발전회사의 전략적 행동에 대해서 미치는 영향을 분석하였다[26, 27]. 그들은 가격에 반응하는 수요 곡선을 시장 균형점 도출에 고려하고, 가격 반응 부하가 시장 가격 증가를 억제할 수 있음을 보였다.

이러한 선행 연구들은 전력 시장 하에서, 수요 반응의 시장지배력 완화의 효과에 대해서 확인하는 결과를 보여주었으나, 가격 반응 부하와 차단가능 부하가 동시에 전력 시장에서 사용되는 현실을 반영하기 위한 추가 연구의 필요성이 존재한다[28, 29]. 또한, 차단 가능 부하 프로그램에 대한 연구들은 가격 반응 부하가 포함되어 있는 전력 시장 및 전략 행위를 고려하지 않고 수요 절감에 따른 효과에 대해 연구하였기에 이에 대한 반영도 필요하다[30, 31].

한편, 전력 시장의 운영에 있어서 참여자들의 전략 변수들이 결정되는 시기는 경우에 따라 다를 수 있기에, 게임이론을 통한 행태 분석에 있어서 슈타켈버그 모형은 선행 경기자와 후행 경기자의 행동 순서가 존재할 때 균형을 도출하고 분석하기 위한 기법으로 이용되어 왔다. [32-35]. 슈타켈버그 모형은 지배적 발전회사와 수용적 발전 회사 사이의 전략행위의 분석, 수요 함수 구성과 발전 스케줄링 사이의 차이를 고려한 분석 등으로 이용되었다. 하지만, 상기 연구들에서도 수요반응 인센티브의 사전 공표가 미치는 전략행위 변화에 대한 연구가 이루어지지 않았다.

인센티브 기반 수요 반응에 대한 게임 이론적 접근은 아직 많지 않으며, 선행 연구들은 대부분 개별 판매 회사 단위에서 이루어졌다. 소매 시장 단위에서의 분석이 주를 이루었으며, 도매 시장에서의 구입 가격은 주어진 것으로 간주하여 연구하였다[32]. [36]에서는 인센티브 수준이 발전 회사의 전략에 미치는 영향을 분석하였지만, 인센티브 수준은 분석에서 지정된 수준으로 이용하였다. 따라서, 이는 수요 자원이 발전회사와 동시에 입찰하고, 수요 반응에 의해 제공되는 인센티브는 사전에 공표된다는 점을 반영하기 위해 추가적인 연구를 필요로 한다.

이에 본 논문에서는 전력 시장에서의 인센티브로 유도되는 수요 반응을 통한 시장지배력 완화에 대한 효과에 대해 알아 보았다. 먼저, 자율적 풀 형태의 전력 시장 하에서 발전 회사와 소비자들의 이윤함수를 자율적 수요 반응 운영의 경우와 인센티브가 사전 공표되는 수요 반응 운영의



경우에서 분석하였다. 각 시장 참여자들의 이윤 최대화를 통한 전략 행위에 의한 시장 균형 결과를 도출하기 위해 게임 이론적 접근을 통하여 분석하였다. 전일 에너지 시장에서의 균형은 가격 결정자들의 쿠르노 모형을 통해 유도하였고, 가격수용자로 행동하는 소비자가 가격결정자로 행동하는 소비자에게 인센티브를 제공하게 하고 그 수준을 시장 운영자가 결정하는 선행 전략으로서의 수요 자원 이용 구조에서는, 선행 전략이 후행 경기자들의 전략에 영향을 미치게 되는 슈타켈버그 모형을 통해 참여자들의 행태를 분석하고 균형점을 도출하는 방법에 대해 해석적으로 분석하였다.

해석적 방법으로서의 시장 균형 분석은, 시장 참여자 수가 늘어나게 되면 그 해를 구해내기가 매우 어렵게 된다. 따라서, 본 논문에서는 시뮬레이션을 통해, 다수의 발전 회사의 사례에 대한 결과를 얻고 이를 분석하였다. 인센티브를 제공하는 수요반응의 영향을 살펴보기 위해 사례 연구에서는 인센티브 사전 공표 상황, 자율적 수요 반응 참여 상황, 과점 상황, 이상적인 완전 경쟁 상황을 비교 분석하였다.

## 1.2 논문의 개요 및 구성

논문의 나머지 부분의 구성은 다음과 같다. 제 2 장에서는 대상이 되는 시장의 구조를 가정하기 위해, 전력 시장의 구조를 의무적 풀과 자율적

폴로 구분할 수 있음을 설명하고, 이에 대한 내용을 서술하였다. 제 3 장에서는 역수요 함수의 구성 및 수요자원을 보유한 소비자들의 취할 수 있는 행동에 대한 가정을 위해, 수요 반응의 종류에 대하여 서술하였다. 그리고, 수요 반응에 의한 시장 균형의 결과가 어떤 식으로 이루어지는지에 대한 영향 분석을 알아보았다. 또한, 시장에 참여하는 경기자들(발전 회사 및 소비자)이 그들의 이윤 최대화와 상대방의 전략을 고려하여 어떠한 행동을 하는지 분석하기 위해 게임 이론에 대하여 기술하였다. 제 4 장에서는 상기 설명과 가정들을 바탕으로 각 상황 별 시장 균형에 대해 알아보고, 적정 인센티브의 사전 공표 효과에 대해 분석하였다. 제 5 장에서는 사례 연구를 통하여 상황 별 시장 균형 결과를 게임 이론적 분석을 통해 살펴보고, 이를 통해 적정 인센티브 산정 후, 사전 공표하는 방법이 잉여 분배의 공정성을 고려한 사회 후생 최대화에 어떠한 영향을 끼치는지 알아보았다. 기존의 러너 지수와 이를 토대로 한 시장지배력 측정 지수들을 통해 상황 별 지수 값을 통하여, 수요 반응이 어느 정도의 시장지배력을 완화시켰는지에 대한 분석을 시도하였다. 제 6 장에서는 모델링 및 사례 연구를 바탕으로 얻어낸 결론에 대하여 서술하였다.

## 제 2장 전력 시장의 구조

본 장에서는 상황 별 시장 균형 도출 방법 서술에 앞서 전력 시장의 구조에 대하여 서술한다. 전력 시장의 구조에 관련한 내용을 먼저 언급하는 이유는 분석의 대상이 되는 전력 시장에 대한 가정을 우선함으로써, 논문의 이해에 대한 혼돈을 피하기 위해서 이다. 시장의 구조와 청산 방식에 관련한 연구들은 그 양이 워낙 방대하고, 세밀한 부분까지 의견이 분분할 정도이지만, 본 논문에서는 기초적인 내용만을 정리하여 수록하였다.

### 2.1 전력 시장의 구조

전력 시장의 구조는 각 국가 별 전력 산업의 상황에 따라 서로 다른 방식으로 시스템을 구성하고, 이를 발전시켜 왔다[37]. 초창기 전력 시장은 가격의 투명성과 효율적인 운영을 목표로 개설되었으며, 이 목표를 달성하기 위해서 여러 방법으로 발전되어 왔다. 초창기에는 모든 시장 참여자가 하나의 풀에 자신의 용량을 모두 참여시키고, 비용 경쟁을 통해 가격을 결정하는 의무적인 풀(Mandatory Pool)의 형태를 가지고 있었다. 전력 계통을 전반적으로 운영하는 담당자는 계통의 송전선 상황과 같은 제약들을 모두 고려하여 급전 순위를 결정하고, 이를 통해 시장을 청산 시켰다. 다시 얘기하면, 시장 운영자(Market Operator)와

계통운영자(System Operator)가 결합되어 하나의 운영자가 모든 것을 통제하는 형태였다. 시장 운영자는 발전회사들의 입찰과 소비자들의 입찰(또는 예측 부하수준)을 고려하여 시장을 청산시키는 역할을 하며, 계통운영자는 송전 용량과 같은 계통 설비들을 고려하여 실제 급전량을 조정하게 되는 역할을 하는데, 초창기에는 이를 모두 고려하여 수급균형을 맞추었다. 이와 같은 상황에서 발전 회사 또는 소비자는 자신의 전력 가격 위험에 대한 회피를 원하게 되었고, 이는 복잡한 시장 청산과정을 가진 강제적인 풀 형태에서는 매우 어려운 실정이었다. 이에 따라, 발전사 및 소비자가 사전계약을 맺고, 자신들의 수급 계획을 계통 운영자에게 알려주는 쌍무계약(Bilateral Contract) 형태의 시장이 발전하게 되었다. 쌍무 계약은 그 시작에서 전력의 단가를 알 수 있는 지표가격(Reference Price)의 부재와 정보확보의 불완전성으로 인하여 어려움이 있게 되고, 이를 해결하기 위해 계통 제약들을 고려하지 않은 전일 시장을 개설하여 사전 계약의 지표로 삼게 되었다. 하지만, 전력 재화의 특성 상, 상시 수급 균형을 위한 계통 특성 반영은 불가피하며, 이에 따른 조정 과정인 Balancing mechanism(혹은 Balancing market)의 기능이 반드시 필요하였다. 이러한 자율적 풀(Voluntary Pool)은 에너지 시장의 운영을 담당하는 시장 운영자와 balancing mechanism을 담당하는 시스템 운영자가 분리되어 있었다. 영국 시장은 이러한 철학의 대표적인 시스템으로서, NETA 는 상기 모습을 잘

보여주고 있다[38].

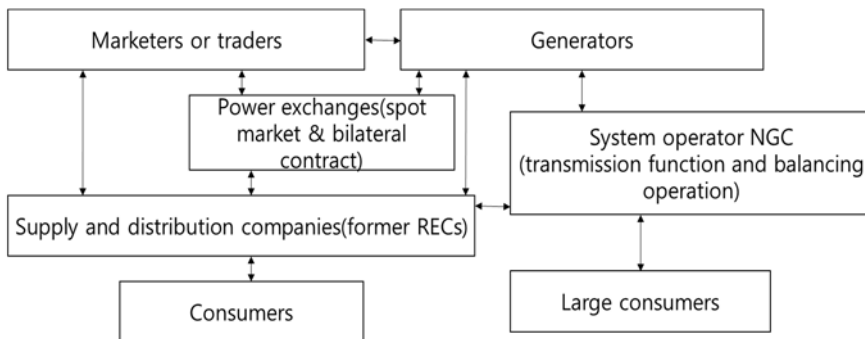


그림 2.1 영국 NETA 시기의 시장 참여자 사이의 관계도[38]

한편으로는, 기존의 의무적인 풀의 형태를 지속적으로 발전 시키는 방식을 택하여 시장을 발전 시키는 경우가 있었다. 시장 운영자와 계통 운영자의 역할을 모두 포함한 단일 운영자가 발전 회사들의 입찰들을 바탕으로 계통 상황을 고려하여 목적함수가 되는 비용 최소화 또는 사회 후생 최대화 문제를 푸는 방식의 시장 발전을 지속하였다. 그 과정에 있어서, 계통 수급 균형에 필요한 추가 비용 부분 산정 및 그 비용 배분의 형평성은 큰 문제가 되었다. 모든 사용자가 동일한 수준의 계통 유지에 대한 비용 부담은 형평성에 맞지 않으며, 실제의 조류 흐름과 같은 계통 제약에 따라 사용자들이 비용을 차등 부담하는 방법론이 힘을 얻어 연구가 진행되었다. 이로 인하여 지역별로 가격을 나누어 부담시키는 방법이 연구 되었으며, 이는 Zonal Pricing 의 이름으로 연구되었다. 이에 더 나아가 지역을 좀더 세분화 시키는 Nodal Pricing 의

개념까지 진보하게 되었으며, 이에 따라 지역별 가격(Locational Marginal Pricing)을 통해 사용자들에게 전력 사용에 대한 비용을 부담을 시키는 방법론으로 발전시켰다. 미국의 PJM 을 위시한 주(州) 별 독립 계통 운영자들은 이러한 철학을 통해 시장을 발전 시켰으며, 미국 연방 규제 위원회(Federal Energy Regulation Council, FERC) 은 이를 정리하여 Standard Market Design 을 만들었다[39].

물론, 상기한 두 가지 발전 방향에서 상호작용이 없었던 것은 아니다. 선도 계약을 기반하고, 시스템 운영을 Balancing mechanism 으로 사후에 처리하는 형태에서도 중앙 집중적 시장 운영을 일부 도입하였고, 지역별 가격 체계를 통하여 혼잡에 대한 의무를 어느 정도 배분할 수 있도록 하였다[40]. 또한, 의무적 풀의 진화를 통해 Nodal Pricing 을 이루어낸 부분에 있어서도, 재무적인 위험 회피 및 시장지배력 억제 등의 목적을 위해 선도 시장을 개설하고, 자가 스케줄 또한 충분히 반영될 수 있도록 여건을 조성하기도 하였다.

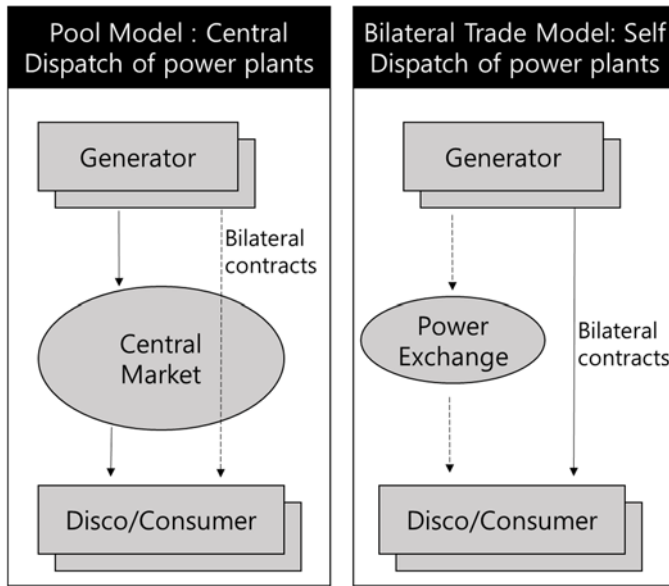


그림 2.2 풀 모델과 쌍무 계약 모델의 개념적인 표현 [40]

현재의 전 세계적으로 전력 시장 구조를 살펴 보았을 때, 선도 기반의 전력 거래와 전일 에너지 시장의 운영이 혼재된 형태로 진화한 경우가 대부분이다. 하지만, 기본 철학을 비교하였을 때, 이론적으로는 시스템 운영을 위한 제약을 사후에 고려하는가 동시에 고려하는가로 그 시장의 구조를 구분할 수 있을 것이라고 판단한다.

이와 같이, 에너지 시장을 운영하는 주체는 풀의 형태에 따라 자신의 역할이 다르며, 이에 따라 각각의 풀 형태에 따라 에너지 시장에 대한 분석은 달라져야 한다. 의무적인 풀 구조와 자율적인 풀 구조를 시간흐름에 따른 모형화 해보면 다음과 같다.

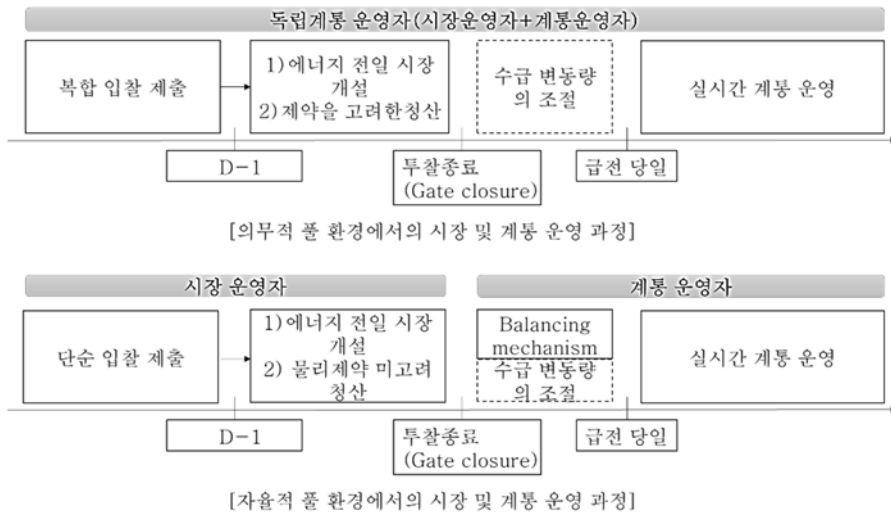


그림 2.3 전력 시장 구조 별 시장 및 계통 운영 과정

두 시장 구조의 차이점은 에너지 전일 시장 입찰 시에 자신의 입찰에 대해서 어떠한 형태의 입찰을 제출하느냐의 차이가 있다 [41].

의무적 풀 형태의 시장 구조에서는 물리적 제약에 대한 문제를 독립계통 운영자가 청산 시에 풀게 되어 있으므로 별도의 수급 균형 조절의 과정이 존재하지 않는다. 시스템 운영자는 복합 입찰에서 얻게 되는 정보들, 예를 들어, 램프 단위가격, 기동 비용, 무부하 비용, 에너지에 따른 발전 비용 함수 등을 받아 물리적 제약을 포함하여 최적의 계획을 수립하므로 추가적인 균형 조정 없이 에너지 시장을 청산할 수 있다. 독립 계통 운영자는 시장 참여자들의 정보를 알고 있고, 이를 통해 시장의 정상적 작동 여부를 기준 청산값(완전경쟁에서의 값 또는 역사적 데이터 값)과의 비교를 통해 판별할 수 있다. 즉, 시장 참여자의 행위를 운영자 입장에서



구속할 수 있다는 뜻이 된다. 이는 급전량 결정의 주체가 운영자라는 의미로도 풀이할 수 있다.

이에 자율적 풀 형태의 시장구조는 단순 입찰 정보를 바탕으로 다른 물리적 제약 없이 시장 운영자가 받은 입찰들을 바탕으로 수급이 교차하는 부분에서 에너지 시장을 청산시킨다. 이는 물리적 제약을 고려하지 않은 청산이며 재무적인 청산이라고도 볼 수 있다. 따라서, 계통의 물리적 제약 조건을 확인 받지 않은 결과에 대해서 실제 시스템 운영을 위해 별도의 계통 제약을 고려한 수급 조절을 할 필요가 있다. 시스템 운영자는 계통 운영 전일, 시장 참여자들의 정보를 받아 수급 균형점과 청산 가격을 결정하고 계통 제약을 고려하여 Balancing mechanism(혹은 Balancing market) 을 통해 최종 운영 계획을 확정한다. 시장 참여자들은 자신의 전력 판매 또는 구입에 대한 입찰을 시스템 운영자가 지정한 마감 시간 전까지 제출하게 된다. 제출된 입찰들을 바탕으로 시스템 운영자는 에너지 시장 청산을 수행하고, 향후 실시간 운영을 위한 balancing market 을 열어 수요 변화에 대비한 발전 자원의 사용 순서를 정하게 된다. 즉, 시장 운영자의 입장에서는 사용자의 행위에 대한 구속을 할 수 없다는 의미가 된다. 이는, 급전량 결정의 주체가 시장 참여자가 된다고도 풀이할 수 있다.

## 2.2 본 논문에서 가정하는 시장 구조

본 절에서는 논문에서 분석하고자 하는 대상이 되는 전력 시장의 구조에 대해서 먼저 서술한다. 구조에 대한 서술을 먼저 하는 이유는 상기한 바와 같이 전력 시장은 여러 종류가 존재하고, 이에 따라 본문에서 대상으로 하는 전력 시장을 이해하는 데 있어서 혼돈을 없애고자 함이다. 대상이 되는 전력 시장은 에너지 유일(Energy-only) 시장이고, 예비력 시장 및 Co-optimized 시장 메커니즘은 고려되지 않는다. 이 에너지 유일 시장은 자율적인 풀로서, 에너지 거래에 있어서 쌍무계약은 고려되지 않는다. 따라서, 소비자들은 도매 전력 시장의 가격에 완전히 노출되게 된다. 이러한 가정은 다음과 같은 목적으로 이루어지게 되었다. 첫 째로, 에너지 유일 시장을 가정하는 이유는, 기타 시장에서의 입찰이 에너지 시장 입찰과 같이 이루어지게 되면, 시장 참여자는 시장 지배력 행사의 방법으로, 타 시장에 입찰하여 자신의 이윤을 최대화 할 수 있는 방법을 추구할 수 도 있다. 따라서, 에너지 유일 시장을 가정하였다. 둘째로, 만약, 의무적 풀을 상정하고, 송전 제약을 고려하여 수요 반응의 영향을 분석하면, 전력 산업 구조적 특징에서 기인하는 용량 철회를 통한 시장지배력 행사 효과와 송전 제약으로 인해 발생할 수 있는 시장지배력 행사 요소가 혼합되어, 그 효과 분석에 모호성이 나타날 수 있기 때문이다.

전일 시장에서는 시장운영자는 수요 곡선과 공급량에 대한 입찰들을 받고 시장의 균형을 결정한다. 전일 에너지 시장의 값들을 바탕으로 balancing mechanism 에서 계통 제약에 따른 사항들은 조정되도록 가정하였다. 또한, 발전 회사들의 발전 비용 함수와 같은 정보들은 이미 알려져 있다고 가정하였다.

상기 시장 구조의 가정을 바탕으로 발전 회사 및 소비자의 행태를 분석하기 위해서는, 수요 반응의 의미와 효과, 그리고 시장지배력의 행사 방법에 대하여 알아보아야 한다. 따라서, 다음 장에서는 수요 반응과 게임 이론에 대하여 알아보겠다.

## 제 3 장 수요 반응과 게임 이론

### 3.1 수요 반응의 분류

수요 반응은 운영자의 수급 균형을 위한 하나의 도구로 사용되던 과거에서, 소비자들의 전력 사용에 대한 의사를 시장에 반영할 수 있는 하나의 수단으로 발전하고 있다.

미국의 연방 규제위원회의 견해 및 학계의 의견에 따르면, 수요 반응 프로그램은 크게 두 가지로 나눌 수 있다[8, 42]. 하나는 인센티브 기반 수요 반응 프로그램(Incentive based demand response program) 이고, 다른 하나는 가격 기반 수요 반응 프로그램(Price based demand response program) 이다. 인센티브 기반 수요 반응 프로그램은 운영 주체가 수요 반응 프로그램 참여자와 사전에 부하 절감에 대한 계약을 맺고, 수요 절감 이벤트가 발생될 경우, 미리 결정된 인센티브를 제어 성과에 따라 제공하는 방식의 프로그램이다. 이 프로그램은 에너지 시장 청산 과정에 포함되지 않고 외부의 작용으로 작동하는 방식이다. 대표적인 예로, 전통적 수요 관리 방식인 직접부하제어, 차단 가능부하 운영, 그리고 시장 기반의 수요 반응인 수요 입찰, 보조서비스 프로그램, 용량 시장 프로그램 등이 있다. 직접 부하 제어 프로그램은 전력 계통의 신뢰도 및 안정성 등을 위협하는 문제가 발생할 때 인센티브를 지급하는

대신, 프로그램 운영 주체가 원격으로 해당 참여자의 설비를 정지시키거나 가동시키는 프로그램을 지칭한다. 차단가능 서비스 프로그램은 수요 반응 이벤트 발생 시, 부하를 절감하는 대신 요금을 감면해 주거나 보상을 지급해주는 형식의 프로그램이다. 비상시 수요 반응 프로그램은 최대 수요 시간 동안 부하를 줄인 고객에 대하여 인센티브를 제공하지만 부하 절감 행위는 강제성을 가지고 있지 않다. 하지만 강제성을 가지고 있는 타 프로그램에서 전력 사용 패턴 변화에 대하여 지급하게 되는 인센티브의 수준에는 차이가 있으며, 일반적으로 그 보상은 더 작은 가치를 가지게 된다. 용량 시장 프로그램은 일종의 보험의 형태를 띠는 프로그램으로서 긴급 상황 시, 참여자는 사전에 협의된 수준의 부하 절감을 시행한다. 용량 시장 프로그램의 참여자는 수요 절감 이벤트 발령 시, 일정 기간 동안 부하 절감에 대한 의무가 있으며 이를 수행하지 않은 경우 패널티를 부과받는다. 해당 계약 기간 동안에 부하 절감은 지시되지 않을 수도 있으나 제공되는 용량에 관련한 인센티브는 그대로 받게 된다. 시행 주체는 대체로 ISO(Independent System Operator) 또는 RTO(Regional Transmission Operator) 가 제공하는 프로그램이다. 타 수요 반응 프로그램과의 차이점은 가변적인 인센티브를 제공받는 것이 아닌 참여자가 보유한 설비에 대하여 평가 받고 이에 대하여 고정적인 인센티브를 지급받게 된다[7, 8].

수요 입찰 프로그램은 부하절감을 제공하는 참여자가 절감 시, 지급받기

원하는 가격과 절감 가능 부하량을 제시하여 낙찰 시에 수요 절감 이벤트에 참여하게 되는 프로그램이다. 수요입찰을 급전 최적화 과정에 직접적으로 통합하여 운영하는 전일 수요 입찰 제도로, 참여자는 부하를 절감하려는 가격과 전일 기준으로 MW 단위의 절감 수준을 입찰한다. 이러한 입찰이 낙찰되는 경우, 참여자는 거래일에 부하절감을 실시하게 되고 만약 부하 절감을 수행하지 않으면 사전에 결정된 패널티를 부과받게 된다. 보조서비스 프로그램은 수요 반응 참여자가 운영 예비력의 형태로 보조서비스 시장에 부하 절감을 입찰하는 방식이다. 수요 자원들은 발전 회사들과 동일한 형태로 예비력 시장에 참여하여 발전 자원들과 경쟁하게 된다. 만약, 낙찰된 경우, 예비력 자원으로 편성되며, 실제 사용이 이루어지게 되면, 시장 가격으로 정산 받게 된다[7].

가격 기반 수요 반응 프로그램은 제어 불가능한 프로그램으로써 말단 소비자에게 요금제의 형태로 자발적인 부하 절감을 유도하는 프로그램으로써, 대표적인 프로그램으로는 계시별 요금제(Time-Of-Use Rate), 실시간 요금제(Real-Time Pricing), 피크 요금제(Critical Peak Pricing) 등이 있다.

계시별 요금제는 시간대 별로 다른 단위 요금을 적용하는 요금제로 시장 가격에 기인하지 않는 요금이다. 계시 별 요금제는 off-peak 와 on-peak 시간대로 구분하여, 피크 시간대에 더 높은 요금을 적용하여 전기

사용의 감소를 유도한다. 하지만, 경우에 따라 시간대 별로 요금 차등을 더 나누어 운영하는 경우도 있다.

실시간 요금제는 매 시간 단위마다 결정되는 도매시장의 실시간 전력가격을 반영한 요금제로 일전, 혹은 시전에 소비자는 해당 시장 가격 정보에 대하여 제공받게 된다. 도매 시장 가격이 그대로 전달되는 경우도 있으며, 전력회사가 일부의 이윤을 포함시켜 전달하는 경우도 있다.

피크 요금제는 기본적인 구조는 계시별 요금제이나, 계통의 신뢰도 및 도매가격 급등 시에 프로그램 시행 주체는 소비자와 미리 정한 횟수, 시행 시간 등을 바탕으로 이벤트를 발생시켜 기본 계시별 요금과 비교하여 매우 높은 요금을 제한된 시간 동안만 적용시키는 요금제이다.

수요 반응 프로그램들은 반드시 상기 구분에 맞추어 운영되는 것이 아니라, 국가 별로 그들의 목적에 맞추어 일부 변형되어 운영될 수 있다.

그림 3.1은 상기 프로그램들을 구분한 표이다.

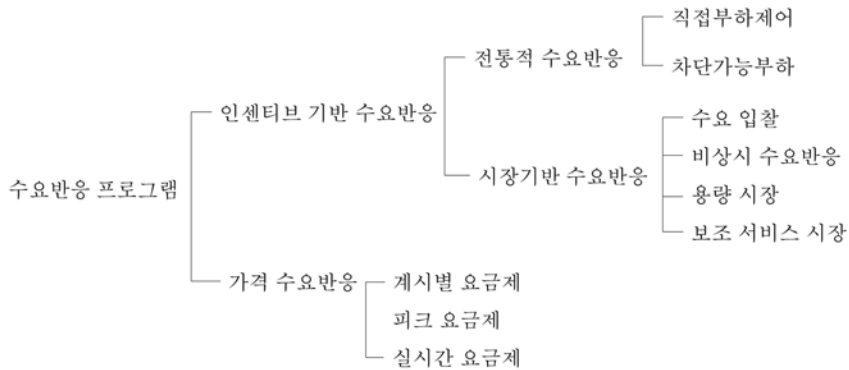


그림 3.1 보상 지급 방식에 따른 수요 반응 프로그램의 분류[8]

본 논문에서는 가격 기반 방식의 수요 반응 프로그램을 통한 소비자들의 기본 참여와, 인센티브 기반 수요 반응 프로그램의 선별적 참여로 인한 영향을 알아보기 위해 두 프로그램을 모두 적용한 상황을 상정하였다. 가격 결정자로 행동하는 소비자의 경우, 요금제 형태의 가격 기반 수요 반응을 할 것인지, 인센티브를 통한 수요 반응을 시행할지에 대해 고민하게 된다.

이러한 수요 반응들은 전통적으로 사회 후생 향상에 도움을 주는 것으로 알려져 왔다. 다음 절에서는 수요 반응의 사회 후생 향상에 대한 영향을 알아보고, 가격 기반 수요 반응이 시장에 들어왔을 때의 사회 후생 변화에 대한 큰 틀에서의 이해를 제공하고자 한다.



## 3.2 수요 반응의 사회 후생에 대한 영향

수요 반응은 사회 후생 향상에 있어서 효과적인 도구로 잘 알려져 있다 [43]. 이런 의견은 가격 반응 부하의 전력 시장으로의 도입 이전의 환경에서 기인 한다. 다시 말해, 수요는 비탄력적인 것으로 간주되어온 상황에서 수요 반응의 이용은 사회 후생을 증가시킨다고 할 수 있다. 역수요 함수가 비탄력적이어서 전통적인 개념과 같이 기울기가 무한인 역수요 함수로 적용될 경우, 모든 소비자들의 전력 사용에 대한 효용은 무한대로 평가되게 된다<sup>1</sup>. 하지만, 소비자들은 실제로 전력 사용에 대하여 자신이 얻는 효용은 제각기 다르게 되며, 이러한 이유로 비탄력적 역수요 함수로 결정된 전력 요금은 사회 후생을 저하시키게 된다. 소비자들의 효용을 정확히 반영한 내재 효용함수와 공급 함수의 교차점은 실제 사회 후생을 최대화할 수 있게 된다. 이해를 돕기 위해 아래의 그림을 통하여 비탄력적 수요 함수 적용 시, 전통적인 DSM 적용 시, 그리고 내재 효용함수 적용시의 시장 가격 및 사회 후생을 설명할 것이다[44].

---

<sup>1</sup> 기존의 비탄력적 수요 함수는 이론적으로 소비자 잉여를 평가할 수 없다.

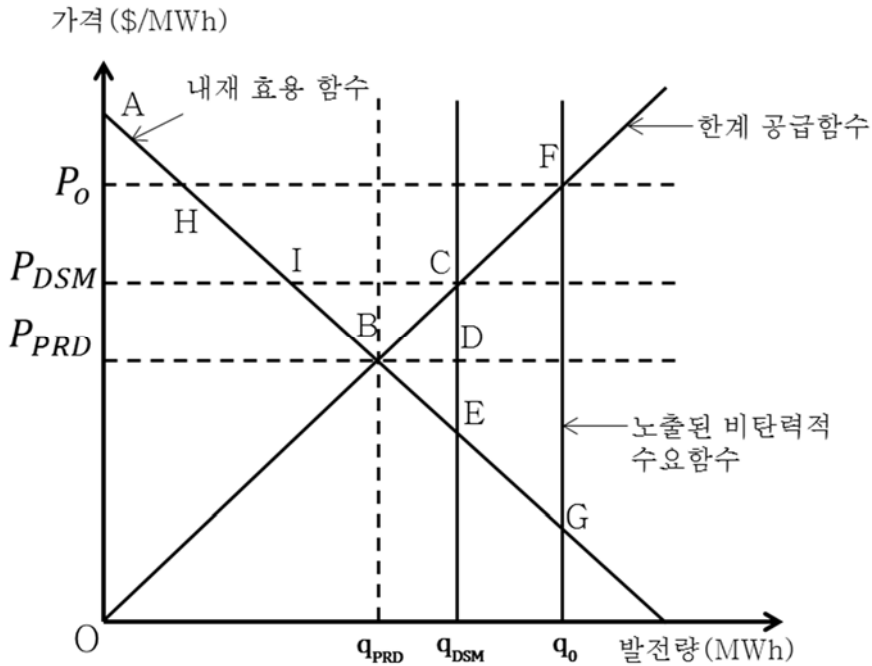


그림 3.2 수요 반응의 사회 후생에 대한 영향

그림 3.2는 비탄력적 수요 함수 적용 시, 스케줄링 방법, DSM 적용 시 스케줄링 방법 그리고 가격 반응 부하 적용 시 스케줄링 방법들이 사회 후생에 어떠한 영향을 미치는지 나타내는 그림이다. 먼저, 소비자 효용이 정확히 반영되었을 때 시장 청산과 사회 후생 값에 대하여 알아보자. 내재 효용 함수와 발전 비용 함수의 교차점은  $(q_{PRD}, P_{PRD})$  이다. 이에 대해서 얻어지는 사회 후생은  $AOB$  의 넓이로 표현할 수 있다. 이에 비해, 비탄력적 수요 함수 적용 시, 스케줄링 방법에서의 시장 청산 가격은  $P_0$  으로 결정된다. 이에 따른 생산자 잉여는 시장 가격  $P_0$  과 발전량인  $q_0$  의 곱에서 발전 비용을 뺀  $P_0OF$  이며, 소비자 잉여는 내재 효용 함수에서

시장 가격을  $q_0$  까지 적분한  $AP_0H - HGF$  와 같다. 따라서, 사회 후생은 소비자잉여와 생산자 잉여의 합인  $AOB - FBG$  이다. 내재 효용 함수가 반영된 사회 후생과 비교하였을 때, 후생 손실 분은  $FBG$  와 같다. 여기에서 만약 DSM 에 의한 수요 감축이  $q_{DSM}$  만큼 이루어졌다고 가정하자. 이렇게 되면, 사회 후생에 대한 손실을  $FBG$  에서  $CBE$  로 줄일 수 있고, 이는 사회 후생 증가의 결과를 가져다 준다. 따라서, 전통적인 수요 개념에서의 수요 반응은 사회 후생향상의 결과로 귀결될 수 있는 것이다. 하지만, AMI 인프라가 구축되고, 소비자들이 자신의 효용을 고려한 수요 입찰을 할 수 있게 된다면 어떨까? 가격 반응 부하가 완전히 시장에 적용된다면, 계약에 의한 부하 감축은 언제나 사회 후생 감소의 결과를 가져다 준다. 왜냐하면 추가적인 부하 감축은 전체 수요를 언제나  $q_{PRD}$  이하로 만들기 때문이다. 이 경우, 다시 시장 청산 가격은 올라가게 되고, 낙찰되지 못한 부하와 발전 용량에 의해 사중손실이 발생하게 된다. 그러나, 상기 내용은 이상적인 상황을 가정하였을 때의 결과이고, 실제 상황에서 수요 반응은 많은 경우, 사회 후생을 증가시키는 결과를 가져오게 된다. 상기한 바와 같이, 본 논문에서는 내재 효용 함수가 반영되는 가격 기반 수요 반응을 가정하고 있다. 이러한 가정의 이유는 향후, AMI 설비의 완전한 도입으로 인한 미래의 상황을 상정하였기 때문이며, 이를 기반으로 인센티브 기반 수요 반응이 어떤 식으로 이용될 지에 대해서 알아보기 위함이다. 그러므로, 내재 효용

함수와 실 적용되는 비탄력적 수요 함수의 괴리는 없으며, 인센티브 기반 수요 반응에 의해 일부의 사회 후생이 감소하는 면이 존재하게 된다.

### 3.3 게임 이론적 접근을 통한 시장 균형

앞선 절에서는 수요 반응 프로그램의 구분과 이를 통한 사회 후생 변화를 알아보았다. 사회 후생 저해 요인으로서 인프라 미흡으로 인한 정확한 가격 신호의 전달 부재를 언급하였다. 그렇다면, 소비자가 소통할 수 있는 인프라가 완벽히 구축되어 있는 상황, 즉, 내재 효용함수가 반영되어 있는 경우에서의 전력 시장에서는 언제나 사회 후생이 최대가 될 수 있는가?

전력 시장에 참여하는 발전 회사의 경우, 언제나 자신의 이윤을 최대화하기 위해 행동한다. 특정 발전 회사가 전력 산업 내에서 시장지배력을 가지고 있는 경우, 시장지배력 행사로 인하여 시장 가격을 조작할 수 있는 조건이 성립된다. 즉, 발전 회사의 의지대로 시장 청산 결과를 바꿀 수 있다는 것을 의미한다. 이로 인해, 사회 후생을 구성하는 소비자 잉여와 생산자 잉여에서 일부의 소비자 잉여를 생산자 잉여로 이전시켜 자신의 이윤을 증대시킬 수 있다. 발전 회사들은 이윤 증대를 위해 자신이 얼마만큼의 가격을 입찰할지, 또는 얼마만큼의 용량을 철회해야 할지를 고려하게 된다. 독점의 형태를 가진 경우, 자신의 이윤

최대화에만 주안점을 두고 행위를 결정하면 되겠지만, 과정의 형태를 띄고 있다면, 상대의 이윤 추구행위 또한 고려해야 자신의 이윤을 최대화할 수 있다.

이렇게 서로의 행동을 예측하고 그들의 행동에 맞추어 자신의 행동에 대한 의사 결정을 하는 것에 대한 연구는 과거로부터 게임이론이라는 이름으로 많은 연구가 진행되어 왔다. 이러한 행위에 대해서 분석하기 위해서는 게임 이론과 내쉬 균형(Nash Equilibrium)에 대한 내용을 미리 언급하여야 할 필요성이 있다. 그 이유는 시장 지배력을 보유한 참여자가 과연 어떠한 행동을 하게 되며, 결과적으로 그들의 행동에 의해서 어떠한 균형이 도출되는지에 대한 것을 알아야 하기 때문이다. 게임 이론의 기초와 그로부터 나오게 되는 내쉬 균형과 관련된 연구들은 많은 내용이 있기 때문에, 본 논문에서 모든 기초적 이론을 전개하는데 있어 필요한 내용만 집중적으로 서술하도록 하겠다.

게임 이론에서 참여자들의 특정 전략 쌍이 해가 되기 위해서는 각 참여자들이 모두 해당 전략 쌍을 선택할 용의가 있어야 한다. 즉, 각 참여자들은 자신이 선택한 전략이 상대 전략에 미치는 영향, 그리고 상대방의 전략이 자신의 전략에 미치는 영향을 모두 고려하여 자신의 선택이 이윤최대화에 있어서 최선의 전략이 되어야 한다는 의미와 같다. 또한, 자신의 선택이 사후에 상대방이 선택할거라 예측한 전략과 맞아떨어지게 된다면 자신은 전략을 수정할 요인이 없어지게 된다. 그

이유는 자신의 선택이 예상한 전략 쌍에서 최선의 선택이기 때문이다. 이와 같이 모든 참여자들이 타 참여자들의 전략을 예상하고 자신의 전략을 선택하며, 그 선택된 전략쌍이 사후적으로 모든 경기자의 예측과 들어맞게 될 때, 이러한 전략을 내쉬 균형전략이라고 한다 [45].

이와 같이 내쉬 균형 상태에서는 모든 참여자가 자신의 전략에서 이탈할 유인을 가지지 않으므로 모두가 해당 전략 쌍을 선택하는 결과를 가지게 된다.

만약 게임 내에  $n$  명의 게임 참가자가 존재하고, 이들이 상대의 전략을 고려하여 이루어진 전략 쌍이 더 이상 이탈요인을 가지지 않을 때, 즉,

$n$  -명게임에서의 내쉬 균형은 다음과 같이 정의된다.

정의 : 정규형식 게임  $G = \{S_1, \dots, S_n; u_1, \dots, u_n\}$  에서 경기자  $i = 1, 2, \dots, n$  에 대해, 또한 모든  $s_i \in S_i$  에 대해 다음의 조건을 만족하는 전략  $u_i(s_1^*, \dots, s_n^*)$  은 내쉬 균형이다.

$$u_i(s_1^*, \dots, s_{i-1}^*, s_i^*, s_{i+1}^*, \dots, s_n^*) \geq u_i(s_1^*, \dots, s_{i-1}^*, s_i, s_{i+1}^*, \dots, s_n^*)$$

이를 풀어서 설명하면, 어떤 특정 전략 조합이 내쉬 균형이 되려면, 그 조합에 속한 각 전략들이 주어진 상대경기자들의 전략에 대응하여 최선의 전략이 되어야 한다는 뜻이다. 임의의  $i$  경기자는  $s_i^*$  의 전략이 다른 그

어떤 전략과 비교하여 그로 인한 이윤이 높다는 것이다.

본 논문에서는 전력 시장에서의 시장 균형을 공급량을 바탕으로 경쟁하는 게임 이론적 접근을 통하여 찾아 볼 것이다. 공급량을 통한 내쉬 균형 도출은 쿠르노 게임(Cournot Game)의 균형으로 잘 알려져 있으며, 다음 절에서는 이를 설명할 것이다.

### 3. 3. 1 쿠르노 게임과 전력 시장에서의 균형

상기 절에서와 같이 내쉬 균형은 모든 참여자가 자신의 전략을 수정할 요인을 가지지 않는다는 점을 알 수 있었다. 이 균형 이론을 기본으로, 게임 참여자들은 여러 가지 수단을 동원하여 경쟁할 것이다. 예를 들어, 판촉을 통해 제품을 알릴 수도 있고, 제품의 질을 높이거나, 단가를 낮추어 소비자들을 끄는 방법 등이 있다. 그 중에서도, 제품의 공급량의 조절을 통해 경쟁하는 것을 게임이론에서는 쿠르노 게임이라고 한다[45].

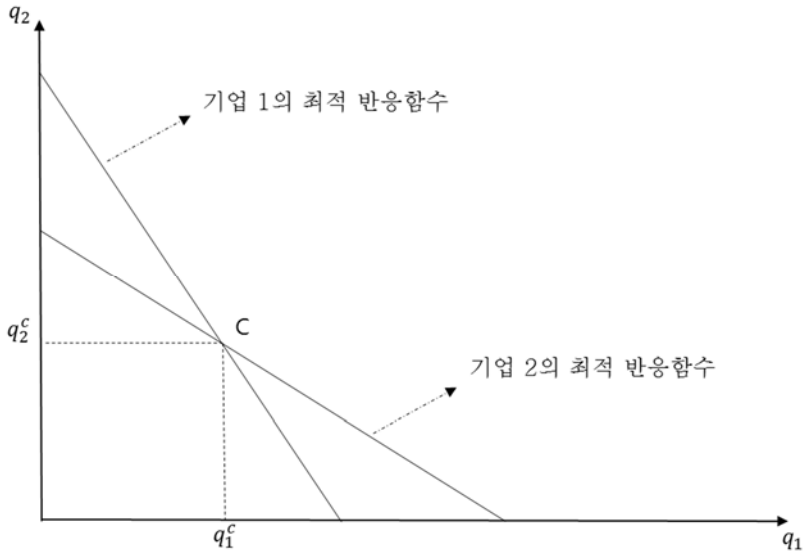


그림 3.3 쿠르노 게임의 균형점 그래프

쿠르노 균형은 동시 게임이기 때문에 상대방의 생산량을 알 수 없으며, 이에 따라 자신의 이윤 함수를 자신의 생산량으로 편미분한 값이 0 이 되게 하는 최적 반응 함수(Best Response Function) 의 교차점에서 균형점이 발생하게 된다. 그림 3.3 과 같이, 쿠르노 게임의 결과는 각 경기자들의 최적 반응 함수의 교차점에서 결정되는  $(q_1^c, q_2^c)$  되며, 그 교차점은 완전 경쟁에서의 게임과 비교하였을 때, 전체 균형생산량은 줄어들게 되고, 개별 경기자들의 이윤은 증가하는 결과를 나타내게 되며, 전체 사회 후생은 감소하게 된다.

쿠르노 게임을 전력 시장에 적용하여 생각해보자. 발전 회사들은 전력 시장에서의 청산을 위해 자신의 발전량을 입찰하게 되고, 이러한 입찰 정보를 바탕으로 시장 균형이 결정된다. 모든 발전회사들은 상대의



이윤함수를 알고 있고, 전일 전력 시장에서 입찰 용량만을 결정하며, 전일 에너지 시장이라는 동시게임에 참여한다는 가정하에 쿠르노 게임이라 할 수 있으며, 쿠르노 균형은 그의 해로서 상기한 내쉬 균형을 이용한다.

상기 가정과 전력 시장에서의 쿠르노 게임에서 각 참여자는 상대 참여자들의 발전량에 대하여 예상을 하고 그 예상하에서 자신의 이윤을 최대로 만드는 발전량을 결정하며, 해당 발전량들로 이루어진 전략쌍에서 그 누구도 자신의 전략을 수정할 유인이 없다는 의미에서 내쉬 균형은 전력 시장에서의 쿠르노게임에서 안정적인 전략쌍을 나타낸다고 할 수 있다.

### 3. 3. 2 슈타켈버그 게임과 전력 시장에서의 균형

상기 절에서는 쿠르노 게임과 전력 시장에서의 균형에 대하여 알아보았다. 발전회사들의 생산량 경쟁을 통한 균형 도출은 쿠르노 게임이며, 이는 전일 에너지 시장이라는 게임에서 이루어지는 동시 선택 게임이다. 게임에 참여하는 경기자 전부가 전일 에너지 시장에서 운영자에 의한 청산 이전까지 상대의 전략을 알 수 없는 상황에서 자신의 전략을 선택하는 경우인 것이다. 하지만, 인센티브 기반 수요 반응이 참여하는 경우에는 동시 선택이라는 가정이 적용되지 않게 된다. 상기 절에서 언급한 수요 반응 프로그램을 다시 살펴보도록 하자. 가격 기반

수요 반응 프로그램의 경우, 발전회사의 공급량 결정과 동일한 시점에서 자신의 입찰을 정함으로써, 동시 선택 게임인 쿠르노 게임으로 설명할 수 있다. 하지만, 인센티브 기반 수요 반응 프로그램의 운영의 경우, 공급량 또는 소비량 결정과 더불어 인센티브라는 다른 변수가 존재하게 된다. 이 인센티브라는 변수는 운영 주체에 의해 게임 참여자들의 입찰 이전에 사전에 공표되는 형식을 띠고 있다. 따라서, 이를 쿠르노 게임으로만은 게임의 균형을 설명할 수 없게 된다.

이를 설명하고 알맞은 모형을 도입하기 위해 슈타켈버그 게임(Stackelberg Game)을 도입할 필요성이 있다. 슈타켈버그 모형은 쿠르노 모형과 같이 입찰량에 대하여 경쟁하는 참여자들의 최선 전략에 대한 균형을 구하는 것에 대해서 같으나, 각 참여자가 동시에 전략을 선택하는 쿠르노 모형과는 다르게 선행 경기자와 후행경기자가 존재하여, 선행 경기자가 먼저 전략을 제시하면, 그 전략을 바탕으로 후행경기자가 자신의 전략을 선택하게 되는 순차게임이다<sup>2</sup>.

슈타켈버그 모형은 다음과 같은 그래프로 설명할 수 있다.

---

<sup>2</sup> 엄밀한 의미에서 인센티브 기반 수요 반응을 포함한 전력 시장에서의 게임은 공급량 경쟁과 인센티브 수준 결정이라는 다른 경쟁 요소가 포함되어 있는 동적 게임으로 풀이할 수 있다. 하지만, 선행경기자와 후행경기자가 존재하여 선행 경기자의 전략이 후행 경기자의 전략에 영향을 미친다는 기본 원리를 고려하였을 때 슈타켈버그 게임으로 설명하는 것도 큰 무리가 없을 것이라 판단한다.

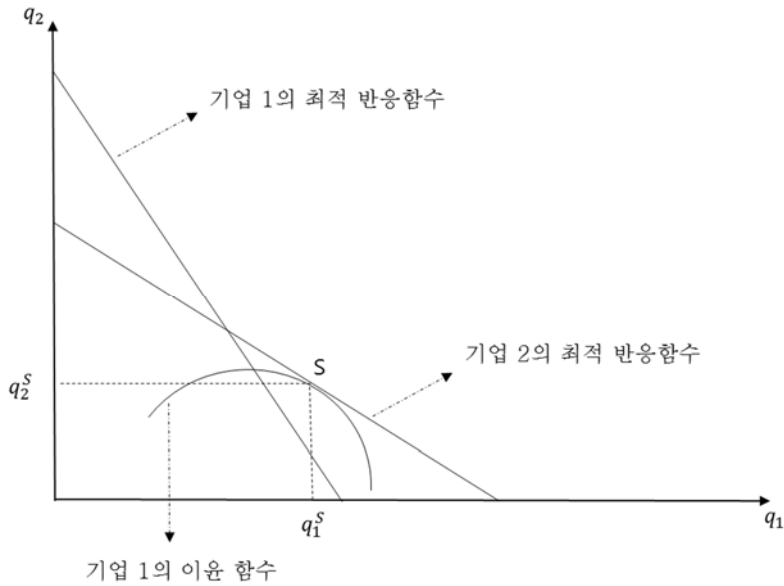


그림 3.4 슈타켈버그 게임의 균형점 그래프

먼저, 기업 1을 선행 경기자, 그리고 기업 2를 후행 경기자라고 하자. 그림에서 보는 것과 같이, 두 기업의 반응 함수의 교차점에서 쿠르노 균형이 이루어진다. 하지만, 슈타켈버그 게임의 경우, 기업 1이 먼저 행동하고 그 행동을 바탕으로 기업 2가 행동하게 된다. 이는 기업 2의 최적 반응 함수를 먼저 구하고, 이를 제약 조건으로 고려하여 기업 1이 자신의 이윤을 최대화 하는 자신의 생산량을 결정하는 것으로 풀어서 설명할 수 있다. 쿠르노 게임과는 달리 기업 2의 최적 반응 함수는 고려되지만, 기업 1의 최적 반응함수는 그렇지 않으며, 기업 1의 등이윤 곡선과 기업 2의 최적 반응 함수의 교차점에서 슈타켈버그 균형 ( $q_1^S, q_2^S$ )가 결정되게 된다. 이러한 균형점에서는 선행 경기자인 기업 1의 생산량은 증가하게 되고, 후행 경기자인 기업 2는 생산량이 감소하게

된다.

이러한 슈타켈버그 게임을 소개하는 이유는 앞서 언급한 인센티브 기반 수요 반응의 특징을 설명하기 위해서이다. 다양한 목적을 위해 이루어지는 인센티브 기반 수요 반응 프로그램은 기본적으로 프로그램 설계 시에 참여자에게 지급되는 인센티브가 전일 에너지 시장에서의 입찰 이전에 결정되기 때문이다. 수요 반응 유도를 위한 인센티브가 사전에 공표되고, 수요반응 참여가능 소비자들은 인센티브 수준을 보고 자신의 이윤을 최대화할 수 있는 수요 반응량을 결정하게 된다. 비단 소비자만이 수요 반응 프로그램의 인센티브에 대하여 이를 고려하고 자신의 전략을 짜는 것이 아니다. 전력 수급 균형에 있어서 수요의 변화는 곧 시장 가격의 변화로 이어지며, 가격 변화는 단일 가격으로 에너지 정산금을 받게 되는 시장 메커니즘의 특성상 입찰에 뛰어들 모든 참여자(후행경기자)들의 이윤에 대한 변화로 귀결되게 된다. 따라서, 발전회사들도 역시 사전에 결정된 수요 반응의 인센티브에 대하여 자신의 전략이 영향 받게 된다. 시장 운영의 시간적 순서를 보게 되면, 인센티브 수준 결정자가 선행 경기자가 되며, 향후 발전회사, 가격결정자로 행동하는 소비자가 후행 경기자로 행동하는 슈타켈버그 게임과 같게 풀이될 수 있는 것이다. 따라서, 외부 수요 반응을 고려한 균형 도출에 있어서는 동시게임만을 고려한 쿠르노 모형보다는 동적게임을 고려한 슈타켈버그 모형을 이용하여 그 결과를 분석해내어야 한다.

여기까지 본 논문에서 제시하는 문제를 풀기 위한 가정들과 해당 가정의 설명을 위한 내용들을 서술하였다. 다음 장에서는 각 상황 별 행태 분석을 통한 시장 균형을 해석적으로 분석하도록 하겠다.

## 제 4 장 상황 별 전력 시장의 균형 모델링

본 장에서는 앞서 설명한 기본 지식들과 가정들을 바탕으로 전력 시장 참여자들의 전략 행위에 의한 시장 균형에 대하여 대수적인 방법을 통하여 정식화하도록 하겠다. 인센티브의 제공 및 수요 반응의 효과를 분석하기 위해서 완전 경쟁 상황, 발전 회사들이 가격 결정자(Price-maker)가 되는 과점 상황, 일부 소비자와 발전 회사들이 가격 결정자가 되는 상황, 인센티브의 사전 공포 효과를 고려하였을 때의 상황에 대하여 시장 균형을 구하는 과정을 서술하도록 하겠다. 본 논문에서는 시장 참여자들을 두 개의 발전 회사와 수요반응 참여소비자, 일반참여소비자들로 구성하고, 시장 균형을 해석적인 방법으로 유도하였다. 수요반응 참여소비자, 일반참여소비자에 대한 정의는 후에 기술하도록 하겠다.

각각의 발전 회사들은 하나의 발전기를 가지고 있고, 이들의 최대 발전량을 입찰한 후, 낙찰된 양을 발전하여 전일 에너지 시장에서 수익을 얻는 형태를 가진다. 발전기의 비용함수는 2차 함수의 형태를 가진다고 가정한다. 발전 비용 함수를  $C_i$  라고 하였을 때, 각 발전 회사는  $q_i$  만큼의 전력을 생산하는 데에 있어서 다음과 같은 비용이 들게 된다.

$$C_i(q_i) = \frac{1}{2}a_i q_i^2 + b_i q_i \quad (4.1)$$

이제, 전력 판매에 대한 각 발전 회사들의 이윤을  $\pi_i$  라고 하자. 이는 다음과 같이 시장 가격과 발전 회사에게 배정된 발전량의 곱에서 그들의 발전 비용을 뺀 값으로 정식화할 수 있다.

$$\pi_i = Pq_i - C_i(q_i) \quad (4.2)$$

여기에서  $P$  는 시장 가격을 나타내고,  $q_i$  는 각 발전회사의 발전량을 의미한다.

역수요 함수의 모델링은 다양한 기법들이 존재하나 본 논문에서는 소비자들의 가격 반응성을 고려한 역수요 함수를 단조 감소하는 일차 함수로 정식화 하였다.

$$P(Q) = e + fQ \quad (4.3)$$

$e$  는 발전량-시장가격 그래프에서 발전량이 0 일 때의 역수요 함수의 값이며,  $f$  는 소비자들의 단위 가격 변화에 대한 수요의 감소량을 나타내며, 역수요 함수의 기울기이다.

## 4.1 완전 경쟁 상황에서의 전력 시장의 균형

본 절에서는 전력 시장에서의 시장 지배력 행사에 의한 균형을 유도하기 이전에 먼저, 2개의 발전 회사가 있는 상황에서 완전 경쟁을 가정한 전력 시장에서의 균형에 대하여 알아보도록 하겠다. 완전 경쟁에서는 모든 참여자들이 시장 가격에 대해 가격 수용자의 역할을 하며, 전일 에너지 시장 입찰 시에 자신의 입찰 행동에 의한 시장 가격 변화를 고려하지 않고 자신의 이윤을 결정하는 행위를 하게 된다.

완전 경쟁에서의 시장 가격을  $P_m$ , 개별 발전 회사의 발전량을  $q_{i,m}$  라고 하면, 이는 각 발전 회사들의 발전량의 합을 역수요 함수에 대입한 것으로 나타낼 수 있다.

$$P_m = e + f(q_{1,m} + q_{2,m}) \quad (4.1.1)$$

이제 소비자의 이윤에 대하여 정식화 하여 보자. 소비자의 역수요 함수는 여러 소비자들이 자신의 효용의 수준을 매집자에게 제출하고, 이를 바탕으로 매집자가 정렬하여 얻어진 결과 이다. 따라서, 시장 가격이 결정되면, 개별 소비자는 자신의 효용과 시장 가격의 차이에 의해 추가 잉여를 얻을 수 있게 된다. 이 추가 잉여들의 총합이 소비자의 이윤으로 풀이될 수 있다.



완전 경쟁 상황에서의 소비자의 이윤을  $\pi_{c,m}$  라고 하면, 이는 다음과 같이 각 소비자들의 단위 효용과 시장 가격의 차와 총 발전량의 곱을 전부 합하는 것으로 정식화할 수 있다.

$$\pi_{c,m} = \int_0^{Q_m} P(q) - P_m dq \quad (4.1.2)$$

여기에서  $Q_m$ 는 발전 회사들의 발전량의 총합이다.

완전 경쟁 시장의 균형은 다음의 사회 후생 최대화 문제를 푸는 것이 된다.

$$\text{Max}_{q_{1,m}, q_{2,m}} SW = \pi_{1,m} + \pi_{2,m} + \pi_{c,m} \quad (4.1.3)$$

*s.t.*

$$q_{i,m} \geq 0 \quad (i = 1, 2) \quad (4.1.4)$$

$$\pi_{i,m} = P_m q_{i,m} - C_i(q_{i,m}) \quad (i = 1, 2) \quad (4.1.5)$$

$$\pi_{c,m} = \int_0^{Q_m} P(q) - P_m dq \quad (4.1.6)$$

$$P_m = e + f(q_{1,m} + q_{2,m}) \quad (4.1.7)$$

여기에서  $\pi_{i,m}$  는 발전회사  $i$ 의 이윤함수이다.

상기 최대화 문제의 해는 발전 회사들을 가격 수용자로 두고, 그들의 이윤을 최대화 조건들을 연립하여 푸는 방법으로도 해를 구할 수 있으며, 다음과 같이 얻어질 수 있다.

$$\begin{bmatrix} q_{1,m} \\ q_{2,m} \end{bmatrix} = \frac{1}{\det B} \begin{bmatrix} f - a_2 & -f \\ -f & f - a_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 - e \\ b_2 - e \end{bmatrix} \quad (4.1.8)$$

여기에서, 행렬  $B$  및  $\det B$  는,

$$B = \begin{bmatrix} f - a_1 & f \\ f & f - a_2 \end{bmatrix}$$

$$\det B = -(a_1 + a_2)f + a_1 a_2 \quad (4.1.9)$$

전체 발전량은,

$$Q_m = q_{1,m} + q_{2,m} = \frac{1}{\det B} [-a_2(b_1 - e) - a_1(b_2 - e)] \quad (4.1.10)$$

로 정해지게 된다. 다음 절에서는 과점 상황에서의 균형에 대해 살펴보도록 하겠다.

## 4.2 과점 상황에서의 전력 시장의 균형

본 절에서는 발전 회사들이 가격 결정자로 행동하고, 소비자가 가격 수용자로 행동할 때인 과점 상황에서의 시장 균형에 대하여 대수적인 해를 구하도록 하겠다.

본 논문에서 다루는 과점 상황은 두 개의 발전 회사(가격 결정자)와 다수의 소비자가 매집 되어 하나의 소비자와 같이 행동하는 단일 소비자(가격 수용자)로 구성되어 있다.

과점 상황에서의 전력 판매에 대한 각 발전 회사들의 이윤을  $\pi_{i,o}$  라고 하면, 시장 균형에서의 가격과 각 발전 회사들의 발전량의 곱에서 그들의 발전 비용을 뺀 값으로 정식화할 수 있다.

$$\pi_{i,o} = P_o q_{i,o} - C_i(q_{i,o}) \quad (4.2.1)$$

여기에서  $P_o$  는 과점 상황에서의 시장 가격을 나타내고,  $q_{i,o}$  는 과점 상황에서의 각 발전회사의 발전량을 의미한다.

시장 균형 가격은 과점 상황에서의 총 발전량을 역수요 함수에 대입하는 것으로 나타낼 수 있다.

$$P_o = e + fQ_o = e + f(q_{1,o} + q_{2,o})$$

(4.2.2)

이제 소비자의 이윤에 대하여 정식화 하여 보자. 소비자는 가격 수용자로서, 시장 가격이 결정되면, 개별 소비자들은 자신의 효용과 시장 가격의 차이에 의해 추가 잉여를 얻을 수 있게 된다. 과점 상황에서의 소비자의 이윤을  $\pi_{c,o}$  라고 하면, 이는 다음과 같이 각 소비자들의 효용과 시장 균형 가격의 차와 총 발전량을 곱해서 나온 값의 합으로 정식화할 수 있다.

$$\pi_{c,o} = \int_0^{Q_o} P(q) - P_o dq$$

(4.2.3)

발전 회사들은 전일 에너지 시장에 동시에 자신의 발전량을 입찰하는 게임을 수행한다. 발전 회사들은 서로의 보수 함수를 알고는 있지만, 얼마만큼의 양을 전력 시장에 입찰할 것인지에 대한 내용은 알 수 없다. 이와 같이 각 참여자들이 자신의 용량을 가지고 동시게임에서 전략적 행위를 하는 경우, 그 균형 값은 쿠르노 게임의 해로 결정되게 된다. 균형 값을 구하기 위해서는 발전사의 발전량이 미지수가 되는 최적 반응 함수들을 구하여 그들의 교차점을 구하는 방법으로 구해낼 수 있다.

발전 회사들이 각각 자신의 이윤을 최대화하는 조건은 그들의 이윤 함수를 그들의 발전량으로 일계 미분한 값이 0 이 되게 하는 점에서 결정된다. 개별 발전 회사들의 이윤 최대화 조건은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial \pi_{1,o}}{\partial q_{1,o}} = f q_{1,o} + P_o - a_1 q_{1,o} - b_1 = 0 \quad (4.2.4)$$

$$\frac{\partial \pi_{2,o}}{\partial q_{2,o}} = f q_{2,o} + P_o - a_2 q_{2,o} - b_2 = 0 \quad (4.2.5)$$

여기에서  $q_{i,o}$  는 과점 상황에서 개별 발전 회사의 발전량을 나타낸다. 상기 식들에 시장 가격을 대입하여 정리하게 되면,

$$(2f - a_1) q_{1,o} + f q_{2,o} = b_1 - e \quad (4.2.6)$$

$$(2f - a_2) q_{2,o} + f q_{1,o} = b_2 - e \quad (4.2.7)$$

으로 나타낼 수 있다. 이 식들은 개별 발전 회사들의 최적 반응 함수가 된다. 상기 최적 반응 함수들을 연립하여 풀게 되면, 개별 발전 회사들의 최적 발전량과 시장 균형점을 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} q_{1,o} \\ q_{2,o} \end{bmatrix} = \frac{1}{\det A} \begin{bmatrix} 2f - a_2 & -f \\ -f & 2f - a_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 - e \\ b_2 - e \end{bmatrix} \quad (4.2.8)$$

여기에서, 행렬  $A$  및  $\det A$  는,

$$A = \begin{bmatrix} 2f - a_1 & f \\ f & 2f - a_2 \end{bmatrix} \quad (4.2.9)$$

$$\det A = 3f^2 - 2(a_1 + a_2)f + a_1a_2 \quad (4.2.10)$$

을 나타낸다. 따라서, 과점 상황에서의 시장 균형 가격 및 양은 다음과 같이 결정될 수 있다.

$$Q_o = q_{1,o} + q_{2,o} = \frac{1}{\det A} [(f - a_2)(b_1 - e) + (f - a_1)(b_2 - e)] \quad (4.2.11)$$

$$P_o = e + fQ_o$$

(4.2.12)

다음 장에서는 수요 반응 참여자를 포함한 상황에서의 전력 시장 균형에 대해 알아보도록 하겠다.

### 4.3 자율적 수요반응참여를 포함한 상황에서의 균형

본 절에서는 앞서 살펴본 과점 상황에서 별도의 자율적 수요 반응에 참여하는 소비자가 추가될 때의 영향을 분석하는 과정을 수행할 것이다. 먼저, 소비자를 수요반응참여소비자와 일반참여소비자로 나누고, 수요반응 참여소비자가 가격 결정자로서 행동할 때의 시장 균형을 도출해 낼 것이다.

본 절에서 분석하고자 하는 상황에서 참여자들은 가격 결정자가 되는 발전 회사들과 수요반응참여 소비자, 그리고 가격 수용자가 되는 일반참여소비자로 구성되어 있다. 2절에서의 과점 상황과의 차이점은, 앞선 절에서는 부하매집자에 의해 매집된 여러 소비자들이 하나의 주체로서 여겨지고, 시장 가격에 대해서 그대로 수용하는 가격 수용자로 행동하는 것을 가정하였다. 본 절부터는 소비자들을 시장 가격에 대해 자신의 수요를 다른 수요 반응 프로그램에 참여시켜 역수요 함수를

구성하는데 영향을 줄 수 있는 소비자인 수요반응참여소비자와 그렇지 않은 일반참여소비자로 구분하여 정의하도록 하겠다. 수요반응참여소비자들은 자신이 가격에 영향을 미칠 수 있음을 알고, 자신의 이윤을 최대화 하기 위한 행동을 하는 가격 결정자로 행동하며 기타 수요반응 프로그램에 참여할 수 있다. 반면에, 일반참여소비자들은 가격을 주어진 것으로 받아들이고, 타 수요 반응 프로그램에 참여하지 않는 가격 수용자로 행동하게 된다.

이제, 각 참여자들의 이윤 함수를 구하기 위해 우선 발전 회사의 경우부터 고려해보자. 발전 회사들은 각각 하나의 발전기를 가지고 있으며, 발전 회사들의 이윤을 각각  $\pi_{1,wd}$ ,  $\pi_{2,wd}$  라고 하자. 발전 회사들은 전략행위들을 고려하여 자신의 발전량을 결정하게 될 것이고, 이들을 각각  $q_{1,wd}$ ,  $q_{2,wd}$  라고 하면, 이는 다음과 같이 시장 가격과 발전량의 곱에서 그들의 발전 비용을 뺀 값으로 정식화할 수 있다.

$$\pi_{1,wd} = P_{wd}q_{1,wd} - C_1(q_{1,wd}) \quad (4.3.1)$$

$$\pi_{2,wd} = P_{wd}q_{2,wd} - C_2(q_{2,wd}) \quad (4.3.2)$$



$P_{wd}$  는 본 상황에서의 시장 가격을 나타낸다. 2절에서와 다른 점은 수요반응참여소비자의 수요 절감 행위가 균형 결정에 영향을 준다는 점이다. 수요 반응에 의한 시장 균형을 구하기 위해 다음을 생각해보자. 수요반응참여소비자는 가격 결정자로 행동하는 발전 회사들의 전략을 고려하여 자신의 이윤을 최대화할 수 있는 임의의 수요 반응량이 있을 것이고, 그 값을  $q_{wd}$  라고 하자.  $q_{wd}$  에 해당하는 수요를 절감하게 되면, 전일 에너지 시장에 참여하여 시장 가격에 반응하여 자신의 전력 사용 유무를 결정할 수 있는 권리를 잃게 된다. 더 이야기하면, 개별 소비자들의 효용의 정렬로 이루어진 역수요 함수의 구성에서  $q_{wd}$  에 해당하는 소비자들이 수요를 절감하는 행위를 할 경우, 이들의 효용이 고려되지 않게 된다는 뜻이다. 본 논문에서는 수요 반응에 이용되는 자원들은 매집자가 자신이 가지고 있는 개별 소비자들 중, 시장이 낙찰되었을 때 가장 효용이 낮은 순서대로 수요 자원을 배정한다는 가정을 바탕으로 논의를 전개하였다.

상기 가정 하에 결정되는 시장 균형과 이에 따른 수요 자원의 효용 손실분을 나타내면 다음 그림과 같다.

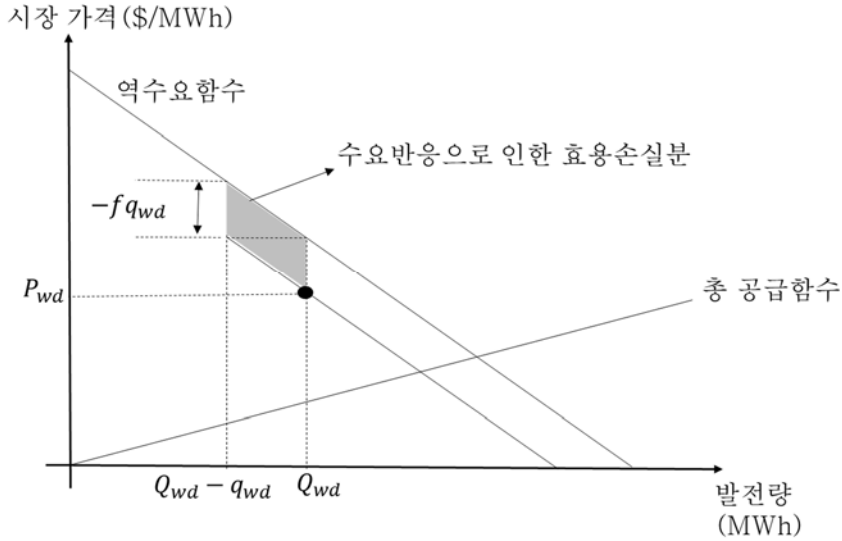


그림 4.1 자율적 수요 반응 참여에 따른 소비자 잉여의 손실분

그림 4.1 은 수요 반응에 의해 영향을 받게 되는 역수요 함수 및 그에 따른 시장 균형을 나타낸 그림이다. 상기 그림과 같이  $q_{wd}$  만큼의 수요 반응은 전력 가격에  $f q_{wd}$  만큼의 시장 가격 변화를 가져오게 된다. 이를 고려하여 추가적으로 별도 수요 반응에 참여하는 경우의 시장 균형가격을 나타내면,

$$P_{wd} = e + fQ_{wd} + f q_{wd} = e + f(q_{1,wd} + q_{2,wd} + q_{wd}) \quad (4.3.3)$$

로 표현할 수 있다. 여기에서  $Q_{wd}$  는 전체 균형발전량이다.

이제 각 소비자 별 이윤함수를 모델링 해보도록 하자. 수요 반응이 균형 가격에 미치는 영향과 더불어, 과점 상황에서의 균형과 달라진 점은

소비자가 둘로 나뉘는 데 따라, 그들의 잉여를 나누어 계산하여야 한다는 점이다. 이들을 어떻게 구분하고, 각각의 이윤함수를 어떻게 나타내는가는 중요한 문제이다. 만약 수요반응참여 소비자와 일반참여소비자를 그들이 가지고 있는 수요의 용량으로 구분하게 된다면 분석과 모델링에 있어서 문제가 발생할 수 있는데, 특정 비율로 각 소비자들의 용량을 나누는 경우, 용량에 따른 효용이 모두 같은 수준이 아니기 때문에 소비자잉여 및 사회 후생의 계산에 있어서 특정한 값으로 표현해낼 수 없기 때문이다. 따라서, 본 논문에서는 개별 소비자가 가진 용량의 크기에 상관없이, 각 소비자들이 전체 소비자 잉여를 임의의 비율로 나누어 가진다고 가정하였다. 본 논문에서는 전체 소비자 잉여 중, 수요반응참여 소비자가 가져가는 잉여의 비율을  $k$ , 일반참여소비자가 가져가는 잉여의 비율을  $1 - k$  로 가정하였다. 이와 더불어, 수요 반응의 효과로 발생할 수 있는 시장 균형 가격의 하락 및 추가 적인 낙찰 부분도 상기 잉여 분배 비율을 부여하였다.

상기한 두 가지 수요에 대한 가정으로 먼저 수요반응참여소비자의 이윤함수를  $\pi_{3,wd}$  라 하고 이를 구해보자. 수요반응참여소비자는 전체 소비자 잉여 중  $k$  만큼의 비율을 가져간다. 여기에서 자신의 이윤을 최대화 하기 위해 별도의 수요 반응을 이용하여 일부 수요를 에너지 시장에 참여시키지 않음으로써, 수요 반응을 수행하지 않을 때 얻을 수 있었던 기회 이윤을 포기하게 된다. 그에 대한 대가로 발전 회사들만이

전략행위를 하는 경우와 비교하여 역수요함수의 변화에 의해 낮아진 시장 가격과 이로 인한 신규 수요 진입으로 인한 잉여 획득으로 이익을 얻을 수 있게 된다. 이를 정리하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

- $\pi_{3,wd} = k(\text{새로이 결정되는 시장 균형점에서의 총 소비자 잉여}) -$

(별도의 수요반응으로 잃게되는 잉여)

(4.3.4)

상기 식을 다시 표현하면, 수요 반응 행위를 하였을 때의 균형의 값에서의 총 소비자 잉여에서 수요의 퇴장에 대한 잉여 손실을 빼준 값으로 표현될 수 있다. 정리하면, 수요 반응은 하락한 시장 균형 가격을 도출할 수 있도록 자신보다 효용이 낮은 부하들의 낙찰을 돕는 역할을 한다. 특정 시장 균형 수준에서 수요 반응 자원들의 효용과 낙찰된 신규 부하들의 효용 차이를 빼주는 것으로 구현할 수 있다.

$$\pi_{3,wd} = k \int_0^{Q_{wd}} P(q) - P_{wd} dq + f q_{wd}^2$$

(4.3.5)

이를 역수요 함수와 시장 균형 가격을 대입하여 정리하게 되면,

$$\pi_{3,wd} = k(-\frac{1}{2}fQ_{wd}^2 - fq_{wd}Q_{wd}) + fq_{wd}^2 \quad (4.3.6)$$

로 나타낼 수 있다. 이 식의 의미는 새로이 결정된 시장균형에서의 수요반응 참여자의 소비자 잉여인 첫 번째 항에 수요 반응에 의해 잃게 되는 잉여손실인 두 번째 항을 합한 것이라고 말할 수 있다.

이제 일반참여소비자의 이윤함수를  $\pi_{4,wd}$  라 하고, 이를 구하기 위한 과정을 알아보도록 하자. 이들은 가격 수용자로서 수요 반응 실행 이전에 청산된 부하들의 잉여와 수요 반응 이후 새로이 결정된 시장 가격에 따라 추가적으로 낙찰되는 부하들의 잉여들의 합한 값으로 소비자 잉여가 결정된다. 이를 다시 쓰면,

- $\pi_{4,wd} = (1 - k)(\text{새로이 결정되는 시장 균형점에서의 총 소비자 잉여}) \quad (4.3.7)$

으로 표현할 수 있다. 이를 정식화하면 다음과 같다.

$$\pi_{4,wd} = (1 - k) \int_0^{Q_{wd}} P(q) - P_{wd} dq \quad (4.3.8)$$

이를 역수요 함수와 시장 균형 가격을 대입하여 정리하게 되면,

$$\pi_{4,wd} = (1 - k)\left(-\frac{1}{2}fQ_{wd}^2 - fQ_{wd}q_{wd}\right) \quad (4.3.9)$$

이 식의 의미는 수요 반응이 시행 후에 소비자 잉여에서 가격 변화로 인한 추가적인 잉여 증가를 합한 것이라고 말할 수 있다.

이제 본 절에서 다루어지는 참여자들 사이의 전략 행위에 의한 시장 균형을 도출하도록 하겠다. 발전 회사들은 전일 에너지 시장에 같이 입찰하는 동시 게임을 수행하고, 발전 회사들은 서로의 보수 함수를 알고는 있지만, 얼마만큼의 용량을 전력 시장에 입찰할 것인지에 대한 내용은 알 수 없는 것은 같다. 여기에 추가적으로 수요반응참여소비자가 가격 결정자로서 추가 된다. 그들도 역시 발전회사들과 마찬가지로 자신의 발전량을 에너지 시장에 입찰하게 된다. 다른 점은 발전회사의 전략 행위는 공급량에 영향을 주는 데에 비해 수요반응참여 소비자는 내재효용함수를 변화시키는 일종의 음의 발전을 한다는 것이다. 시장 운영자의 타 참여자들의 입찰 정보 공개 여부도 역시 과점에서의 그 것과 동일하다. 고로, 그 균형 값은 세 참여자가 서로의 용량을 가지고 전략행위를 하여 얻어지는 쿠르노 균형으로 결정되게 된다. 이를 풀기 위해서는 발전사의 최적 반응 함수들과 수요반응참여 소비자의 최적 반응 함수를 구하여 그들의 교차점을 구하는 방법으로 균형 값을 구해낼 수

있다.

발전 회사들의 이윤을 최대화하는 결과는 각각의 발전회사 이윤 함수를 그들의 발전량으로 일계 미분한 값이 0 이 되게 하는 점에서 결정된다. 이를 정식화 하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial \pi_{1,wd}}{\partial q_{1,wd}} = f q_{1,wd} + P_{wd} - a_1 q_{1,wd} - b_1 = 0 \quad (4.3.10)$$

$$\frac{\partial \pi_{2,wd}}{\partial q_{2,wd}} = f q_{2,wd} + P_{wd} - a_2 q_{2,wd} - b_2 = 0 \quad (4.3.11)$$

이를 상기 최적화 조건에 시장 가격을 대입하면,

$$(2f - a_1)q_{1,wd} + f q_{2,wd} + f q_{wd} = b_1 - e \quad (4.3.12)$$

$$(2f - a_2)q_{2,wd} + f q_{1,wd} + f q_{wd} = b_2 - e \quad (4.3.13)$$

으로 나타낼 수 있다.

이제 수요반응참여소비자의 이윤 최대화를 통한 최적 반응 함수를 구해보자. 수요반응참여소비자의 경우, 발전 회사의 이윤함수 모델링에서는 최대 발전한계 및 미발전을 고려하지 않은 것과는 다르게 수요 반응량의 최소 및 최대량을 고려하여 최대화 문제를 표현하였다. 소비자의 경우, 수요 반응 미참여에 대한 반대 급부로서 전력을 사용함으로써 얻어지는 효용이 존재하기 때문에 경우에 따라서 수요 절감을 수행하지 않을 수도 있기 때문이다. 하지만, 본 논문에서는 수요반응참여소비자를 가격 결정자로 설정하고 문제를 풀었기 때문에, 타 참여자의 전략 변화에 대하여 자신의 전략을 충분히 바꿀 수 있도록 가정하였다. 즉, 타 참여자의 전략에 의해 수요반응참여소비자가 자신의 이윤을 최대화 하지 못하는 상황을 제외하기 위해 수요 자원의 최대량이 충분하다는 가정 하에 해석적인 식을 유도하였다.

상기 수요 자원에 대한 가정들을 바탕으로 수요반응 참여 소비자의 이윤 함수를 최대화 하는 문제는 다음과 같이 정식화 할 수 있다.



$$\max_{q_{wd}} \pi_{3,wd} = k(-\frac{1}{2}fQ_{wd}^2 - fq_{wd}Q_{wd}) + fq_{wd}^2 \quad (4.3.14)$$

*s.t.*

$$0 \leq q_{wd} \leq q_{dmax} \quad (4.3.15)$$

여기에서  $q_{dmax}$  는 수요 자원의 이용 가능한 최대량을 의미한다. 상기 이윤 최대화 문제는 수요 절감 량에 대하여 함수가 Concave한 특성을 가지기 때문에 제약을 고려하여 일계 미분이 0 이 되는 지점에서 값을 최대화 할 수 있다.

Karush-Kuhn-Tucker 조건을 통한 문제 해를 찾기 위해 주어진 문제를 최소화 문제로 바꾸고, 제약 조건을 고려하여 라그랑지안 함수와 구하고, 최적해 확인 조건들을 쓰면,

$$\mathcal{L} = -\pi_{3,wd} + \lambda_1(-q_{wd}) + \lambda_2(q_{wd} - q_{dmax}) \quad (4.3.16)$$

$$-q_{wd} \leq 0, \quad q_{wd} - q_{dmax} \leq 0$$

(Primal feasibility) (4.3.17)

$$\lambda_1 \geq 0, \lambda_2 \geq 0$$

$$(\text{Dual feasibility}) \quad (4.3.18)$$

$$\lambda_1(-q_{wd}) = 0, \lambda_2(q_{wd} - q_{dmax}) = 0$$

$$(\text{Complementary slackness}) \quad (4.3.19)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q_{wd}} = kfQ_{wd} - 2fq_{wd} - \lambda_1 + \lambda_2 = 0$$

$$(4.3.20)$$

이 되고, 여기에서 해를 확인하기 위하여 아래 세 가지의 조건을 확인하여 부합하는 해를 구해낼 수 있다.

i)  $\lambda_2 = 0, q_{wd} = 0$  일 때,

해의 최대화 조건 식에 대입하면, 성립 조건은

$$kfQ_{wd} = \lambda_1 \geq 0$$

$$(4.3.21)$$

가 된다. 그런데  $q_{wd} = 0$  인 경우,  $\lambda_1 < 0$  이 되어, Dual feasibility 조건을 만족시키지 못하게 되고 이에 따라 해가 될 수 없다. 이를 다시 말하면, 수요반응참여 소비자는 자신 이윤최대화를 위해 수요 절감을 시행하며, 자신의 절감량을 0으로 만드는 경우는 없다는 뜻이다.

ii)  $\lambda_1 = \lambda_2 = 0$  일 때,

해의 최대화 조건 식에 대입하면, 최적 반응 함수는 다음과 같이 구해낼 수 있다.

$$kfQ_{wd} - 2fq_{wd} = 0 \quad (4.3.22)$$

여기에서  $q_{wd}$  는 자신의 최소 및 최대량에 대한 제약을 가지게 되므로, 상기 식을  $q_{wd}$  에 대하여 정리한 후, Primal feasibility 조건에 대입하게 되면, 주어진 조건이 해가 되기 위해서는,

$$0 \leq \frac{k}{2}Q_{wd} \leq q_{dmax} \quad (4.3.23)$$

가 되어야 한다.  $Q_{wd}$  앞에 있는 계수는 양의 값을 가지므로, 좌우 부등식에 곱하여 정리하면,

$$0 \leq Q_{wd} \leq \frac{2}{k} q_{dmax} \quad (4.3.24)$$

가 된다. 즉, 전체 발전 회사들의 입찰량에 대한 범위인 상기 부등식 조건 하에서  $q_{wd} = \frac{k}{2} Q_{wd}$  의 수요 절감을 시행하게 된다.

iii)  $\lambda_1=0$ ,  $q_{wd} = q_{dmax}$  일 때,

최대화 조건에 이를 대입하게 되면,

$$kfQ_{wd} - 2fq_{dmax} + \lambda_2 = 0 \quad (4.3.25)$$

이 된다. 주어진 조건이 해가 되기 위해서는  $\lambda_2 \geq 0$  이 되어야 하므로, 이를 고려하여 성립조건을 구해보면,

$$kfQ_{wd} - 2fq_{dmax} = -\lambda_2 \leq 0 \quad (4.3.26)$$

으로 나타낼 수 있다. 이를  $Q_{wd}$  에 대하여 정리하게 되면,

$$Q_{wd} \geq \frac{2}{k} q_{dmax} \quad (4.3.27)$$

으로 나타낼 수 있다. 상기 조건들을 바탕으로 수요반응참여소비자들의 최적 반응 함수를 만들면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$q_{wd} = \begin{cases} \frac{k}{2} Q_{wd}, & 0 < Q_{wd} \leq \frac{2}{k} q_{dmax} \\ q_{dmax}, & Q_{wd} \geq \frac{2}{k} q_{dmax} \end{cases} \quad (4.3.28)$$

수요 절감량이 0 이 되지 않는 범위 내에서 수요반응참여소비자는 상기 식과 같은 최적 반응 함수를 가지게 된다.

상기한 발전 회사와 수요반응참여소비자의 최적 반응 함수들을 연립하여 그들의 교차점을 확인하면, 그 교차점은 시장 균형이 되며, 다음과 같이 시장 개별 참여자들의 전략 값(발전량 또는 수요절감량)들을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
& \begin{bmatrix} q_{1,wd} \\ q_{2,wd} \\ q_{wd} \end{bmatrix} \\
&= \frac{1}{\det C} \begin{bmatrix} -2f(2f - a_2) - kf^2 & (k+2)f^2 & a_2f - f^2 \\ (k+2)f^2 & -2f(2f - a_1) - kf^2 & a_1f - f^2 \\ kf^2 - kf(2f - a_2) & kf^2 - kf(2f - a_1) & \det A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 - e \\ b_2 - e \\ 0 \end{bmatrix}
\end{aligned}
\tag{4.3.29}$$

여기에서,

$$\det C = (-6 - 2k)f^3 + (k+4)(a_1 + a_2)f^2 - 2a_1a_2f
\tag{4.3.30}$$

$$C = \begin{bmatrix} 2f - a_1 & f & f \\ f & 2f - a_2 & f \\ kf & kf & -2f \end{bmatrix}
\tag{4.3.31}$$

따라서, 대상 상황에서의 시장 균형 가격 및 균형 량, 그리고 수요 반응 량은 다음과 같이 결정될 수 있다.

$$\begin{aligned}
Q_{wd} &= q_{1,wd} + q_{2,wd} \\
&= \frac{1}{\det C} [(2a_2f - 2f^2)(b_1 - e) + (2a_1f - 2f^2)(b_2 - e)]
\end{aligned}
\tag{4.3.32}$$

$$q_{wd} = \frac{1}{\det C} [kf(a_2 - f)(b_1 - e) + kf(a_1 - f)(b_2 - e)]
\tag{4.3.33}$$

$$P_{wd} = e + fQ_{wd} + fq_{wd} \quad (4.3.34)$$

여기에서  $Q_{wd}$ 는 총 균형 발전량,  $q_{wd}$ 는 자율적 수요 반응 량, 그리고  $P_{wd}$ 는 시장 균형 가격을 나타낸다. 수요 반응이 포함된 과점 상황에서의 시장 균형을 과점 상황에서의 그 것과 비교하기 위해  $Q_o$ 로 정리해보면, 본 상황에서의 총 균형 발전 량과 수요 반응량을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Q_{wd} = \frac{-2f}{\det C} \det A Q_o \quad (4.3.35)$$

$$q_{wd} = \frac{-kf}{\det C} \det A Q_o \quad (4.3.36)$$

으로 정리할 수 있다. 상기 식에서,  $-2f \det A < \det C$  이므로, 자발적 수요 반응이 포함된 상황에서의 균형 발전 량은 과점 상황에 비해 감소하는 것을 확인할 수 있다. 상황 별 균형 가격의 변화를 살펴보기 위해, 과점 상황과 자율적 수요반응 참여 상황의 시장 균형 가격 식을 상기 수요 반응량과 총 균형 발전량을 대입하여 보자.

$$P_o = e + fQ_o$$

(4.3.37)

$$P_{wd} = e + f(Q_{wd} + q_{wd}) = e + f\left(\frac{-(k+2)f\det A}{\det C}\right)Q_o$$

(4.3.38)

상기 식들은 상호 대소 비교를 위하여 과점상황의 균형 가격과 자율적 수요반응 참여상황에서의 균형가격을 과점 상황의 균형발전량으로 나타낸 것이다. 자율적 수요반응 참여상황의 균형 가격에서,  $\left(\frac{-(k+2)f\det A}{\det C}\right)$  의 값은 언제나 1보다 큰 값을 가지게 되기 때문에 시장 균형 가격은  $P_o > P_{wd}$  이 된다. 즉, 자발적 수요반응이 포함된 상황에서의 시장 균형 가격은 언제나 과점 상황에서의 시장 균형 가격보다 작음을 알 수 있다.



## 4.4 인센티브 공표가 우선되는 수요 반응을 포함한 상황의 균형

### 4.4.1 인센티브 사전 공표 효과 적용 방법의 개요

본 절에서는, 인센티브를 사전에 공표하는 수요 반응의 적용 방법에 대하여 개념적인 설명을 우선하도록 하겠다. 먼저, 소비자들이 가격 수용자이고, 발전 회사들이 가격 결정자인 과점 상황의 경우를 다시 생각해보자. 발전 회사들은 서로의 발전 전략을 고려하여 자신의 이윤이 최대가 되는 발전량을 결정한 후, 에너지 전일 시장에 입찰하게 된다. 그로 인하여 얻어지는 시장 균형의 결과는 발전 회사들이 가격 수용자로 행동하는 완전 경쟁에서의 결과와 비교 하였을 때, 균형 발전 량이 줄어들고 시장 균형 가격이 상승하게 된다.

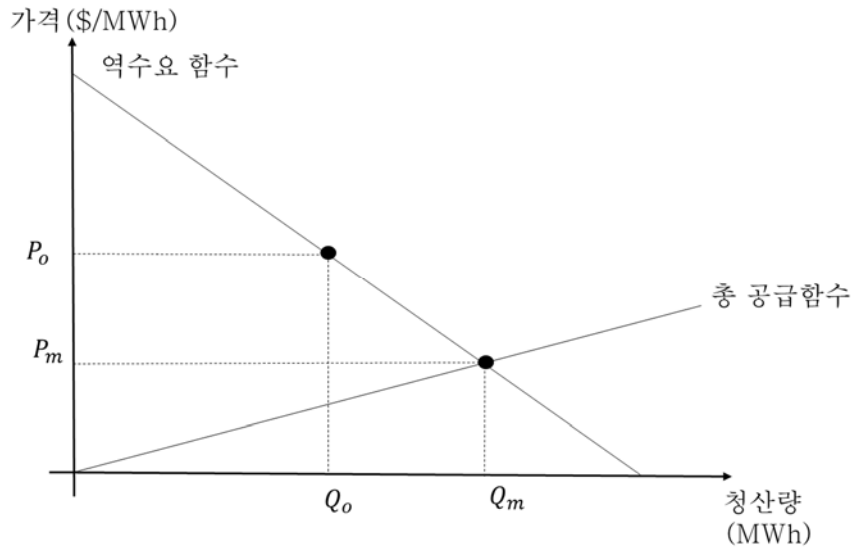


그림 4.2 발전 회사의 전략 입찰로 인한 시장 균형의 변화

그림 4.2 와 같이 발전 회사의 전략 입찰에 의한 가격 상승과 균형발전량 감소는 완전경쟁에서의 소비자 잉여 및 생산자 잉여와 과점 상황에서의 그 것과 비교하였을 때, 생산자 쪽으로의 잉여 이전의 결과를 가져오게 된다.

이러한 상황에서 일부 소비자들이 가격 결정자로서 행동할 때를 고려해보자. 이들은 자신의 이윤을 최대화할 수 있는 수요 절감량을 결정하여 시장에 참여하려 할 것이다. 발전 회사들도 역시 이렇게 가격에 반응하는 수요 절감의 영향을 고려하게 될 것이다. 이에 따라 에너지 전일 시장은 가격 결정자 역할을 하는 발전회사들과 수요 반응 사업자들이 자신의 전략을 정하는 쿠르노 균형에서 발전량과 수요 반응량이 결정될 것이다.

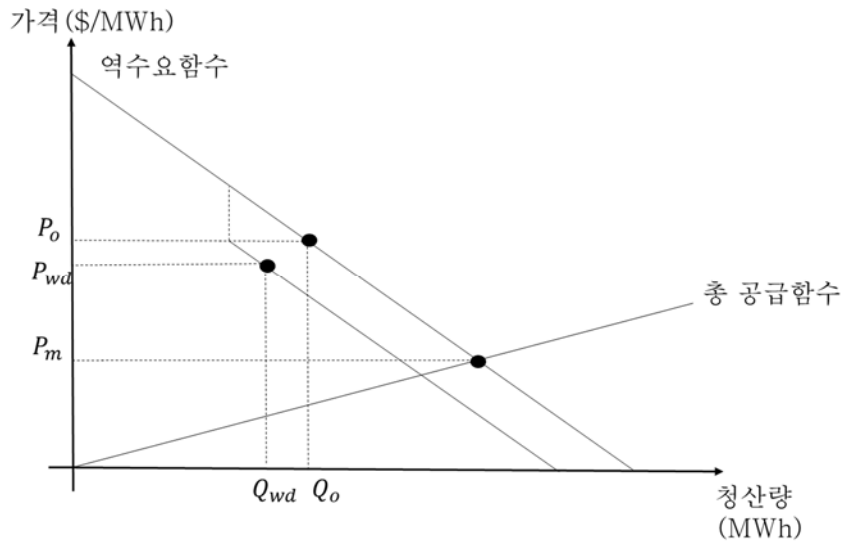


그림 4.3 수요 반응 참여에 의한 영향을 고려한 시장 균형의 변화

그림 4.3 는 수요 반응 참여에 의한 영향을 고려한 시장 균형의 결과를 보여준다. 앞선 절에서 살펴본 균형들의 결과와 같이,  $Q_{wd}$  는  $Q_o$  보다 작은 값을 취하게 되고, 이는 쿠르노 균형의 결과로서 시장 균형 가격이 감소하게 된다. 이러한 균형의 변화는 발전 회사와 소비자 사이의 잉여 분배에 있어서 과점에서의 분배보다 좀 더 공정한 결과를 기대할 수 있게 된다. 왜냐하면, 소비자 잉여는 증가하고 발전 회사의 잉여는 감소하게 되어, 과점 보다는 좀더 완전 경쟁의 잉여 분배에 가까운 결과를 가져오기 때문이다. 물론, 사회 후생의 경우, 발전회사들과 자율적 수요 반응 참여자들의 쿠르노 게임 참여에 의하여 나온 균형 결과는 과점에서의 사회 후생보다 감소하는 결과를 가져오게 된다.

이러한 상황은 수요반응참여소비자가 가격 결정자로서 참여함으로써 절감량을 결정하는 특이한 점에서 기인한다. 수요가 고정인 상황에서는 발전회사들의 전략 행위로 인한 잉여 손실만이 발생하고, 최대로 기대할 수 있는 후생은 변하지 않게 되지만, 수요 자원이 참여하게 되면, 수요 곡선을 변화시키고, 수요 절감에 따라 잉여 손실이 발생하기 때문에 최대로 기대할 수 있는 후생이 줄어드는 효과를 가지게 된다.

분배의 공정성을 위해 자율적 수요 반응을 참여 시켜도, 공급자잉여로부터의 소비자잉여로의 이전량은 완전 경쟁에서의 상황만큼의 잉여 회수를 할 수는 없다. 그 이유는, 과점 상황과 수요 반응이 참여하는 상황 모두 일반참여소비자의 이윤의 최대화를 고려하지 않았기 때문이다.

이에 따라, 본 논문에서는 가격 결정자들이 전략 행위를 할 때, 가격 결정자의 추가로 참여자 수를 늘려 시장지배력을 완화하는 방법을 고려해보았다. 상기했던 자율적 수요반응 참여 상황에서의 균형을 다시 생각해보자. 가격 결정자로 행동하게 되는 참여자는 발전 회사들과 수요반응참여소비자이다. 이들은 자신의 자원을 가지고 전략행위를 하여 자신의 이윤이 최대화 되는 지점에서 시장균형이 도출되도록 유도한다. 이런 상황에서 일반참여소비자들은 그 인프라의 한계로 인하여 가격 결정에 참여할 수 없다. 하지만, 시장 운영자가 수요 반응으로 인한 발전 회사의 시장지배력 완화를 위해, 일반참여소비자로 하여금 가격결정자인

수요반응참여소비자에게 적정 수준의 인센티브(보상금)를 제공하여 가격 결정자의 역할을 할 수 있도록 하면, 시장 균형 가격을 결정하는 가격 결정자가 늘어나게 되는 효과를 가지게 됨으로써, 시장지배력을 더 완화할 수 있게 될 것이다.

따라서, 일반참여소비자들이 전략행위에 대한 변수를 가질 수 있도록 하기 위해서는, 발전회사, 수요반응참여소비자들의 최적반응함수에 영향을 줄 수 있는 변수를 추가할 수 있어야 한다. 이에, 본 논문에서는 하나의 방법으로서, 인센티브 기반 수요 반응 프로그램들을 응용하여, 적정 인센티브 수준을 제공하는 것을 시장 운영 과정 적용하고, 시장 균형에 미치는 영향을 분석해 보았다. 즉, 일반참여소비자가 전략 행위를 할 수 있는 방법으로서, 수요반응참여자에게 수요 절감에 대한 인센티브를 제공하게 함으로써, 가격 결정자로 활동할 수 있게 하는 것이다. 하지만, 그 수준은 전체 사회 후생을 고려하여 결정되게 함으로써, 일반참여소비자에 의해 발생할 수 있는 수요 측 시장지배력 행사로 인한 큰 폭의 가격 하락을 배제하려 하였다. 인센티브 사전 공표를 포함한 전력 시장의 흐름도를 표시하면 다음과 같다.

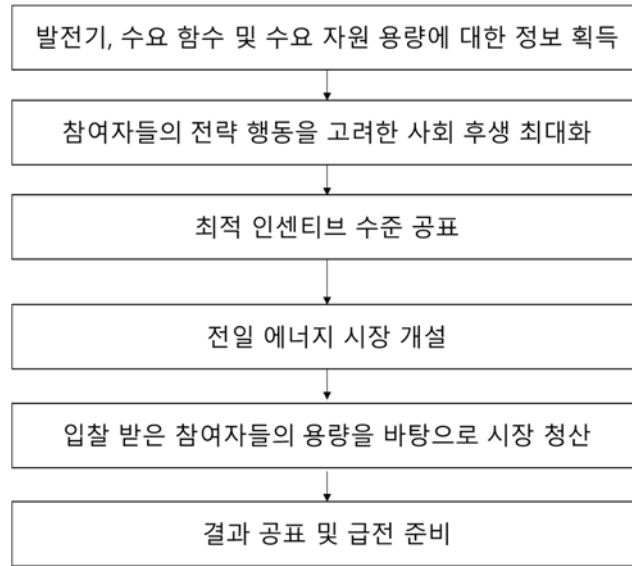


그림 4.4 인센티브 사전 공표를 포함한 전력 시장의 흐름도

시장 운영자는 전일 에너지 시장 개설 이전에 발전기들의 비용함수, 발전 회사들의 발전기 소유정보, 소비자들의 잉여 구성정보, 역수요 함수의 정보, 그리고 최대가능수요반응 용량 등의 정보를 획득한다. 이를 바탕으로 사회 후생을 최대화할 수 있는 인센티브 수준을 결정하고, 그 결과를 시장 개설 이전에 공표하게 된다. 공표된 인센티브 수준을 고려하여 각 참여자들은 자신의 이윤을 최대화 할 수 있는 자원 입찰량을 결정하게 된다. 급전 전일, 시장 운영자는 전일 에너지 시장을 개설하게 되고 각 참여자들의 입찰을 받게 된다. 이 결과를 바탕으로 시장을 청산하고, 청산된 결과를 공표함과 동시에 급전 계획을 마무리하게 된다.

요약하면, 인센티브 사전 공표를 하는 방법의 이용은 일반참여소비자가

수요반응참여소비자에게 인센티브를 제공하여, 일반참여소비자 전체가 시장 가격에 영향을 미치는 가격 결정자가 되게 하여 시장지배력 행사를 완화하는 것이다. 하지만, 인센티브 수준의 결정은 사회 후생 최대화의 목적을 가지고 결정하게 된다. 이로서, 인센티브 수준의 결정은 시장 개설 이전에 사전 공표되기 때문에, 그 수준을 결정하는 주체는 선행 경기자의 지위를 바탕으로 타 참여자들이 용량 철회를 통해 부담 이윤을 가져가려는 행위를 일부 방지하게 할 수 있게 된다.

게임 이론적 접근을 기반하여 설명하면, 인센티브결정 주체, 즉, 시장 운영자가 리더(Leader)가 되고, 전략 행위가 가능한 타 참여자들이 추종자(Follower)가 되는 구조를 가지고 있다. 이는 3장에서 살펴본 것과 같이 슈타켈버그 게임으로 해석할 수 있다.

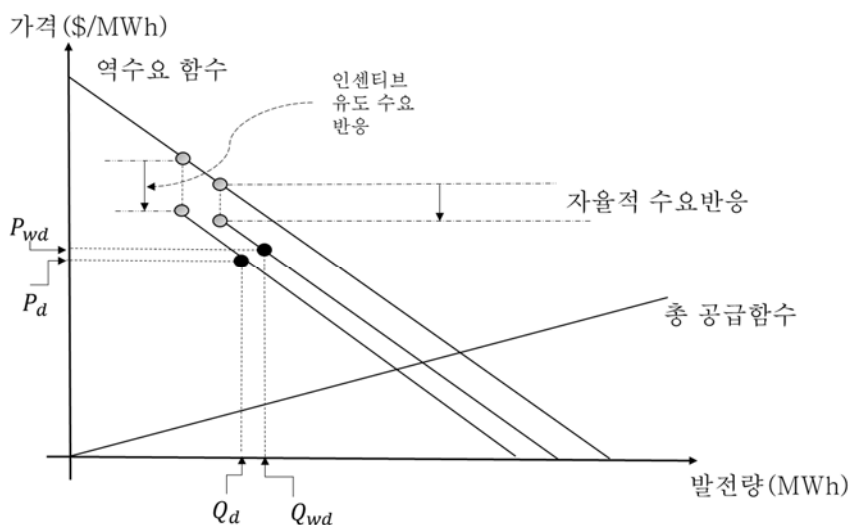


그림 4.5 인센티브 사전 공표 효과를 고려한 시장 균형 점의 변화

그림 4.5 는 인센티브 사전 공표 효과를 고려하였을 때의 시장 가격 및 총 발전량 변화를 개략적으로 나타낸 그래프이다. 발전회사 및 수요 반응 사업자의 전략 행위는 사전 공표된 인센티브 수준에 의해 조정된 시장 균형점( $Q_d, P_d$ )을 만들어내고 이에 따라, 사회 후생의 분배 변화로도 모호할 수 있다. 즉, 시장 가격이 완전 경쟁에서의 값에 좀 더 근사할 수 있게 해주어 사회 후생 변화를 유도한다. 하지만, 본 방법의 결과는 슈타켈버그 균형에서의 시장 균형 결과는 조금 다른 특성을 가지고 있다. 일반적인 슈타켈버그 균형에서는 후행 경기자의 반응 함수를 바탕으로 선행 경기자가 자신의 이윤을 최대화 하는 과정을 통해 균형을 결정하게 되며, 이에 따라 선행 경기자의 생산량은 늘고, 후행 경기자의 생산량은 줄게 된다. 하지만, 본 논문에서 수행한 분석에서는 발전 회사가 모두 후행 경기자가 되고, 선행 경기자의 전략을 결정하는 시장 운영자의 제어 요소는 수요 반응량이 된다. 발전량이 양(陽)의 값으로 설정되는데 비해 수요 반응은 그 절대량이 늘어날수록 시장 청산량을 줄이기 때문에, 결과적으로 전체 청산량이 쿠르노 균형인 과점의 상황보다 줄어들게 된다.

다음 절에서는 인센티브를 사전 공표하는 수요 반응을 포함한 상황에서의 시장 균형을 대수적으로 서술하여 해를 구하는 과정에 대한 이해를 돕도록 하겠다.



#### 4.4.2 대상 참여자들의 이윤함수

대상이 되는 시스템은 두 개의 발전회사, 수요반응참여소비자, 그리고 일반참여소비자로 구성되어 있다. 발전 회사들의 이윤을 각각  $\pi_{1,d}$ ,  $\pi_{2,d}$  라고 하면, 이는 다음과 같이 정식화할 수 있다.

$$\pi_{1,d} = P_d q_{1,d} - C_1(q_{1,d}) \quad (4.4.1)$$

$$\pi_{2,d} = P_d q_{2,d} - C_2(q_{2,d}) \quad (4.4.2)$$

에너지 시장에서의 균형 가격은 각 발전회사들의 발전 입찰량과 수요 반응량을 통해서 결정된다. 이는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_d = e + f(q_{1,d} + q_{2,d} + q_d) \quad (4.4.3)$$

이제 수요반응참여소비자의 이윤을  $\pi_{3,d}$  라고 하자. 이는 다음과 같이 결정될 수 있다. 해당 수요반응참여소비자는 자신의 이윤을 최대화 하기 위해 가격 기반 수요 반응으로 입찰하는 자원 중 일부를 인센티브 기반

수요 반응에 이용함으로써, 시장에 입찰하여 얻을 수 있었던 기회 이윤을 포기하게 된다. 그 대가로 과점 상황에 비하여 낮아진 시장 가격과 자신이 보유한 신규 수요의 낙찰로 인한 잉여에 이익을 얻을 수 있게 된다. 여기에 일반참여소비자로부터 수요 반응의 대가로 받는 인센티브를 포함하여 정식화 하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

- $$\pi_{3,d} = k(\text{새로이 결정되는 시장 균형점에서의 총 소비자 잉여}) -$$

$$(\text{인센티브 사전공표 수요반응으로 잃게되는 잉여}) + (\text{인센티브로 얻게}$$

$$\text{되는 잉여})$$

(4.4.4)

이를 상기 역수요 함수에 대한 가정 및 모델링을 적용하여 정식화 하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\pi_{3,d} = k \int_0^{Q_d} P(q) - P_d dq + f q_d^2 + I q_d$$

(4.4.5)

여기에서  $I$ 는 단위 수요 반응량에 대한 인센티브의 수준이다. 이 식은 다음과 같이 설명할 수 있다. 전일 에너지 시장에서  $Q_d$  만큼의 임의의 균형 발전량이 결정 되었다고 가정하자. 이 결과가 인센티브 기반 수요

반응을 이용하지 않은 역수요 함수의 결과로 나온 것이라면, 첫 번째 항 및 두 번째 항의 값을 그대로 사용하면 된다. 하지만,  $q_d$  만큼의 수요 절감을 통하여 나온 결과라면, 신규 낙찰 수요가 수요 자원을 대신하여 들어오게 된다. 즉, 수요 반응은 시장 가격 결정과 신규 수요 낙찰에 영향을 미쳤다고 할 수 있다. 여기에 수요 반응과 신규 낙찰 수요의 가치 차이만큼을 빼주어야 한다. 여기에 인센티브 수요 자원을 이용하였으므로, 해당 수치만큼의 인센티브를 받아야 된다. 이를 역수요함수와 균형 가격을 대입하여 정리하여 쓰게 되면,

$$\pi_{3,d} = k \left( -\frac{1}{2} f Q_d^2 - f q_d Q_d \right) + f q_d^2 + I q_d \quad (4.4.6)$$

로 나타낼 수 있다. 이는, 상기 절에서의 자율적 수요반응을 고려한 과정 상황에서의 수요반응참여소비자 식과 비교하였을 때, 인센티브에 의한 이윤이 추가적으로 포함된 형태의 이윤함수 이다.

인센티브는 단위 에너지량 당 가격으로서, 그들이 가진 용량에 대한 보상이 아닌, 실제 제어 실적을 바탕으로 지급되는 지원금이다. 이는 모든 수요 자원 보유자에게 단일 수준으로 결정된다. 이를 고려하면, 인센티브 수준의 최저 한계는 사용된 수요 자원 중, 가장 효율 수준이 높은 자원의 수치보다는 크게 결정하여야 한다.

$$I \geq -fq_d$$

(4.4.7)

이제 일반참여소비자의 잉여를  $\pi_{4,d}$  라고 하고, 이를 정식화 하자. 일반참여소비자의 경우, 수요 반응 시행 이전에 소비하기로 결정된 부하들의 잉여와 수요 반응 이후 새로이 결정된 시장 가격에 따라 추가적으로 포함되는 부하들의 잉여를 합한 값이 전체 잉여가 된다. 여기에 수요 반응 량에 대한 인센티브를 제공하므로, 관련 잉여 손실이 추가되어야 한다. 이를 다시 쓰면,

$$\pi_{4,d} = (1 - k)(\text{새로이 결정되는 시장 균형점에서의 총 소비자 잉여})$$

$$- (\text{인센티브 제공으로 잃는 잉여})$$

(4.4.8)

으로 표현할 수 있다. 이를 정식화하면 다음과 같다.

$$\pi_{4,d} = (1 - k) \left( -\frac{1}{2} f Q_d^2 - f Q_d q_d \right) - I q_d$$

(4.4.9)

인센티브를 사전에 공표하는 경우는 발전 회사들과 수요반응 참여소비자의 전략 행위에 있어서 상기한 과점 상황 및 수요반응 참여를 고려한 상황에서의 쿠르노 균형과는 다른 결과를 가져오게 된다. 왜냐하면, 에너지 시장에서 참여자들의 이윤함수 구성에서 인센티브 수준이 포함되어, 전략 행위의 입력 변수들을 모두  $I$ 에 관한 식으로 만들어주기 때문에 그 결과가 달라지게 된다.

다음 절에서는 그럼 이제 시장 균형을 도출하는 과정을 알아보도록 한다.

#### 4.4.3 참여자들의 이윤 최대화 조건과 시장균형 도출

본 절에서는 인센티브 사전 공표 시, 참여자들의 이윤 함수를 모델링하고, 전략 행위를 고려한 적정 인센티브 수준을 구해본다. 먼저 인센티브를 사전 공표하는 방법의 상황을 시간대별로 기술해보도록 하자. 인센티브를 결정하는 주체인 시장 운영자는 자신의 목적함수인 사회 후생을 최대화하는  $I$ 를 결정하여 시장 개설 전에 공표한다. 인센티브가 공표된 이후에 발전회사 및 수요반응참여소비자는 인센티브 수준을 고려하여 자신의 이윤을 최대화하는 최적 반응함수를 만들게 되고 이에 따라 시장 균형이 얻어지게 된다. 이는 앞서 언급한 것과 같이 선행 경기자와 후행경기자가 존재하는 순차게임이라고 할 수 있다. 선행

경기자는 인센티브를 결정하는 주체이며, 후행 경기자는 에너지 시장에 참여하는 발전 회사들과 수요반응 참여 소비자이다. 이러한 슈타켈버그 게임은 역진귀납(Backward induction)으로 그 균형을 구해낼 수 있으며 본 논문에서 기술하는 문제의 해결은 다음과 같이 이루어진다.

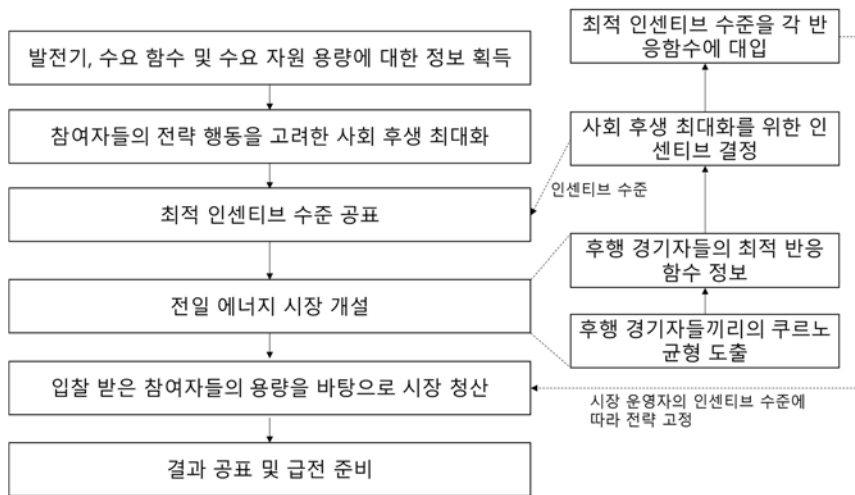


그림 4.6 시장 청산의 흐름과 해를 구하기 위한 역진 귀납과정

먼저, 각 발전회사들과 수요반응참여자들은 상대방의 전략과 사전에 공표된 인센티브 수준을 고려하여 자신의 이윤을 최대화 할 수 있는 최적 반응함수를 구하게 된다. 이렇게 구해진 최적 반응 함수를 바탕으로 시장 운영자는 사회 후생을 최대화하는 문제에 제약 조건으로 최적 반응 함수들을 고려하여 수요반응참여자들을 위한 인센티브를 구해내게 되고, 이 최적 값을 다시 각 후행 경기자들의 최적화 값에 대입을 하면 결론적으로 시장 균형을 도출해낼 수 있다. 이 과정에서 인센티브 정보의 제공은

에너지 시장 개설 이전인 인센티브 공표 시점에 이루어지며, 운영자가 예상한 발전 회사들의 전략 행위(최적반응함수에 따른 쿠르노 균형)들은 실제 전일 에너지 시장에서 적용되게 된다.

발전 회사들의 이윤을 최대화하는 결과는 각각의 발전회사 이윤 함수를 그들의 발전량으로 일계 미분한 값이 0 이 되게 하는 점에서 결정된다. 이를 각 발전 회사 별로 표현하면,

$$\frac{\partial \pi_{1,d}}{\partial q_{1,d}} = f q_{1,d} + P_d - a_1 q_{1,d} - b_1 = 0 \quad (4.4.10)$$

$$\frac{\partial \pi_{2,d}}{\partial q_{2,d}} = f q_{2,d} + P_d - a_2 q_{2,d} - b_2 = 0 \quad (4.4.11)$$

으로 나타낼 수 있다. 이를 정식화한 시장 균형 가격을 대입하여 다시 쓰게 되면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$(2f - a_1)q_{1,d} + f q_{2,d} + f q_d = b_1 - e \quad (4.4.12)$$

$$(2f-a_2)q_{2,d} + fq_{1,d} + fq_d = b_2 - e \quad (4.4.13)$$

이제 수요반응참여소비자의 이윤 최대화를 위한 조건을 구해보자. 이는 다음과 같은 수요 반응 참여소비자의 이윤 최대화 문제를 푸는 것으로 나타낼 수 있다.

$$\max_{q_d} \pi_{3,d} = k \left( -\frac{1}{2} f Q_d^2 - f q_d Q_d \right) + f q_d^2 + l q_d \quad (4.4.14)$$

*s.t.*

$$0 \leq q_d \leq q_{dmax} \quad (4.4.15)$$

상기 이윤 최대화 문제는 일계 미분이 0 이 되는 지점에서 값을 최대화 할 수 있다.

Karush-Kuhn-Tucker 조건을 통한 해의 확인을 위해 주어진 문제를 최소화 문제로 바꾸고, 제약 조건을 고려하여 라그랑지안 함수와 Karush-Kuhn-Tucker 조건들을 나타내면,



$$\mathcal{L} = -\pi_{3,d} + \lambda_3(-q_d) + \lambda_4(q_d - q_{dmax}) \quad (4.4.16)$$

$$-q_d \leq 0, q_d - q_{dmax} \leq 0 \quad (\text{Primal feasibility}) \quad (4.4.17)$$

$$\lambda_3 \geq 0, \lambda_4 \geq 0 \quad (\text{Dual feasibility}) \quad (4.4.18)$$

$$\lambda_3(-q_d) = 0, \quad \lambda_4(q_d - q_{dmax}) = 0 \quad (\text{Complementary slackness}) \quad (4.4.19)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q_d} = kfQ_d - 2fq_d - I - \lambda_3 + \lambda_4 = 0 \quad (4.4.20)$$

으로 표시할 수 있다. 여기에서 해를 확인하기 위하여 아래 세 가지의 조건을 확인하여 부합하는 해를 구해낼 수 있다. 자율적 수요반응참여소비자의 최적 반응 함수를 구했던 방법과는 다르게 변수  $I$  라는 선행경기자의 전략까지 포함이 되기 때문에, 향후 선행경기자의 전략을 구하기 위해서는 수요반응 참여소비자의 반응함수 또한, 인센티브

조건에 따른 반응함수 꼴로 정리할 필요성이 있다.

i)  $\lambda_4 = 0, q_d = 0$  일 때,

라그랑지안 함수의 일계 미분 조건에 대입하면, 성립 조건은

$$kfQ_d - I = \lambda_4 \geq 0$$

(4.4.21)

으로 나타낼 수 있다. 그런데  $q_d = 0$  인 경우,  $kfQ_d \geq I$  이 되는데 이는 일반참여소비자가 제공하는 인센티브 수준이 0보다 작은 값이 되어야 한다는 뜻이다. 일반참여소비자가 수요반응참여소비자에게 인센티브를 받는 일은 없게 되므로 0보다 작은 인센티브는 이치에 맞지 않다. 좀더 생각해보면, 인센티브를 제공하지 않아도 전략 행위를 하는 수요반응참여소비자에 대해서 음의 인센티브, 즉, 패널티를 부여하는 것은 이치에 맞지 않다는 뜻이다. 고로,  $q_d = 0$  에서는 해가 될 수 없다.

ii)  $\lambda_3 = \lambda_4 = 0$  일 때,

해의 최대화 조건 식에 대입하면, 최적 반응 함수는 다음과 같이 구해낼 수 있다.

$$kfQ_d - 2fq_d - I = 0 \quad (4.4.22)$$

여기에서  $q_d$  는 자신의 최소 및 최대량에 대한 제약을 가지게 되므로, 상기 식을  $q_d$  에 대하여 정리한 후, 제약 조건에 대입하게 되면, 주어진 조건이 해가 되기 위해서는,

$$0 \leq \frac{k}{2}Q_d - \frac{I}{2f} \leq q_{dmax} \quad (4.4.23)$$

가 되어야 한다. 이 식을  $I$  에 관한 조건으로 정리하게 되면,

$$kfQ_d \leq I \leq kfQ_d - 2fq_{dmax} \quad (4.4.24)$$

를 얻을 수 있다. 역시  $q_d = 0$  의 조건 때와 마찬가지로 인센티브는 0 미만이 될 수 없고, 수요반응참여소비자에 대한 인센티브 수준의 최소조건을 고려하게 되면,

$$-fq_d \leq I \leq kfQ_d - 2fq_{dmax} \quad (4.4.25)$$

으로 나타낼 수 있다. 이제  $q_d = q_{dmax}$  인 경우에 대하여 알아보도록 하자.

iii)  $\lambda_3 = 0$ ,  $q_d = q_{dmax}$  일 때,

이 조건을 라그랑지안 함수의 최소화 조건에 대입하게 되면,

$$kfQ_d - 2fq_{dmax} - I + \lambda_4 = 0 \quad (4.4.26)$$

으로 쓸 수 있다. 주어진 조건이 해가 되기 위해서는  $\lambda_4 \geq 0$  이 되어야 하므로, 이를 고려하여 성립조건을 구해보면,

$$kfQ_d - 2fq_{dmax} - I = -\lambda_4 \leq 0 \quad (4.4.27)$$

으로 나타낼 수 있다. 이를  $I$  에 대하여 정리하게 되면,

$$I \geq kfQ_d - 2fq_{dmax} \quad (4.4.28)$$

으로 나타낼 수 있다. 상기 조건들과 식 4.4.7을 고려하여 수요반응참여 소비자들의 최적 반응 함수를 구하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$q_d = \begin{cases} \frac{k}{2}Q_d - \frac{I}{2f}, & -fq_d \leq I \leq kfQ_d - 2fq_{dmax} \\ q_{dmax}, & I \geq kfQ_d - 2fq_{dmax} \end{cases} \quad (4.4.29)$$

앞서 구했던 발전 회사들과 수요반응참여소비자의 최적 반응함수들의 교차점을 구하면 발전회사들과 수요반응참여소비자의 쿠르노 균형점을 결정할 수 있다. 세 최적 반응 함수를 연립하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} 2f - a_1 & f & f \\ f & 2f - a_2 & f \\ kf & kf & -2f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_{1,d} \\ q_{2,d} \\ q_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 - e \\ b_2 - e \\ I \end{bmatrix} \quad (4.4.30)$$

상기 식을 풀게 되면,

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} q_{1,d} \\ q_{2,d} \\ q_d \end{bmatrix} \\
 &= \frac{1}{\det C} \begin{bmatrix} -2f(2f - a_2) - kf^2 & (k+2)f^2 & a_2f - f^2 \\ (k+2)f^2 & -2f(2f - a_1) - kf^2 & a_1f - f^2 \\ kf^2 - kf(2f - a_2) & kf^2 - kf(2f - a_1) & \det A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 - e \\ b_2 - e \\ I \end{bmatrix} \\
 & \hspace{15em} (4.4.31)
 \end{aligned}$$

여기에서,

$$\begin{aligned}
 C &= \begin{bmatrix} 2f - a_1 & f & f \\ f & 2f - a_2 & f \\ kf & kf & -2f \end{bmatrix} \\
 & \hspace{15em} (4.4.32)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \det C &= (-6 - 2k)f^3 + (k + 4)(a_1 + a_2)f^2 - 2a_1a_2f \\
 & \hspace{15em} (4.4.33)
 \end{aligned}$$

으로 나타낼 수 있다. 앞선 자율적 수요 반응에서 유도한 시장 균형 값을 구한 것과 달라진 점은 수요반응참여소비자의 최적 반응 함수에 변수인  $I$ 가 포함된다는 점이다. 따라서, 후행 경기자 사이의 시장 균형에서의 개별 참여자들의 전략은 다음과 같이 결정된다.

$$q_{1,a}^*(I) = \frac{1}{\det C} [(2a_2f - kf^2 - 4f^2)(b_1 - e) + f^2(k + 2)(b_2 - e) + (a_2f - f^2)I]$$

(4.4.34)

$$q_{2,a}^*(I) = \frac{1}{\det C} [(2a_1f - kf^2 - 4f^2)(b_2 - e) + f^2(k + 2)(b_1 - e) + (a_1f - f^2)I]$$

(4.4.35)

$$\begin{aligned} q_a^*(I) &= \frac{1}{\det C} [kf(a_2 - f)(b_1 - e) + kf(a_1 - f)(b_2 - e) + \det A \cdot I] \\ &= \frac{-kf}{\det C} \det A Q_o + \frac{\det A}{\det C} I \end{aligned}$$

(4.4.36)

$q_{1,a}^*(I)$  는 발전 회사 1의 균형 발전량,  $q_{2,a}^*(I)$  는 발전 회사 2의 균형 발전량 그리고,  $q_a^*(I)$  는 수요반응참여소비자의 균형 수요절감량이다. 총 발전량  $Q_a^*(I)$ 은  $q_{1,a}^*(I)$ 와  $q_{2,a}^*(I)$ 의 합으로 나타낼 수 있다. 이는,

$$\begin{aligned} Q_a^*(I) &= q_{1,a}^*(I) + q_{2,a}^*(I) \\ &= \frac{1}{\det C} [(2a_2f - 2f^2)(b_1 - e) + (2a_1f - 2f^2)(b_2 - e) \\ &\quad + I(a_1f + a_2f - 2f^2)] \\ &= \frac{-2f}{\det C} \det A Q_o + \frac{1}{\det C} (a_1f + a_2f - 2f^2)I \end{aligned}$$

(4.4.37)

으로 나타낼 수 있다. 시장 균형에서의 최적 반응 함수들을 제약으로 운영 주체는 사회 후생 최대화를 위한 인센티브 결정 문제를 풀어 최종적으로 해를 구할 수 있다. 이를 정식화 하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 \max_{q_{1,d}, q_{2,d}, q_d, I} SW &= \pi_{1,d} + \pi_{2,d} + \pi_{3,d} + \pi_{4,d} \\
 &= \left( -\frac{1}{2}fQ_d^2 - fq_dQ_d \right) + fq_d^2 + P_dQ_d - C_1(q_{1,d}) - C_2(q_{2,d})
 \end{aligned}
 \tag{4.4.38}$$

*s.t.*

$$0 \leq I \leq kfQ_d - 2fq_{dmax}
 \tag{4.4.39}$$

$$I \geq -fq_d
 \tag{4.4.40}$$

$$P_d = e + f(q_{1,d} + q_{2,d} + q_d)
 \tag{4.4.41}$$

$$\begin{aligned}
 q_{1,d} = \frac{1}{\det C} [ & (2a_2f - kf^2 - 4f^2)(b_1 - e) + f^2(k + 2)(b_2 - e) + (a_2f \\
 & - f^2)I ]
 \end{aligned}
 \tag{4.4.42}$$



$$q_{2,d} = \frac{1}{\det C} [(2a_1f - kf^2 - 4f^2)(b_2 - e) + f^2(k + 2)(b_1 - e) + (a_1f - f^2)I]$$

(4.4.43)

$$\begin{aligned} q_d &= \frac{1}{\det C} [kf(a_2 - f)(b_1 - e) + kf(a_1 - f)(b_2 - e) + \det A \cdot I] \\ &= \frac{-kf}{\det C} \det A Q_o + \frac{\det A}{\det C} I \end{aligned}$$

(4.4.44)

상기 최적화 문제의 해의 쌍을  $\{q_{1,d}^*(I^*), q_{2,d}^*(I^*), q_d^*(I^*), I^*\}$  라고 하면, 이는 인센티브 사전 공표 효과를 고려한 시장 균형이라고 할 수 있다.

인센티브에 대한 각 참여자들의 전략들이 받는 영향에 대하여 살펴보면, 발전 회사들은 인센티브 증가에 대하여 자신의 발전량을 줄이게 된다. 인센티브의 수준은 양의 값을 가지고 인센티브에 곱해주는 계수는 음의 값을 가지게 되기 때문이다. 수요반응 참여 소비자의 경우, 자신의 절감량을 늘리는 되는 결과를 확인할 수 있다. 그 이유는 인센티브 수준에 곱해주는 계수  $\frac{\det A}{\det C}$  가 양의 값을 가지기 때문이다.

결과적으로 총 균형 발전량은 수요반응이 자율적으로 참여하는 상황에서의 총 균형 발전량보다 줄어들게 된다. 아래의 식은 최적 인센티브 수준을 반영한, 총 균형 발전량을 나타낸다.

$$\begin{aligned}
Q_d^*(I^*) &= q_{1,d}^*(I^*) + q_{2,d}^*(I^*) \\
&= \frac{1}{\det C} [(2a_2f - 2f^2)(b_1 - e) + (2a_1f - 2f^2)(b_2 - e) \\
&\quad + I^*(a_1f + a_2f - 2f^2)] \\
&= \frac{-2f}{\det C} \det A Q_o + \frac{1}{\det C} (a_1f + a_2f - 2f^2) I^*
\end{aligned} \tag{4.4.45}$$

상기 식에서 확인할 수 있듯이, 총 균형 발전량은 수요 반응이 자율 참여한 상황과 비교하여  $\frac{1}{\det C} (a_1f + a_2f - 2f^2) I^*$  이 더해져, 총 발전량이 줄어들게 된다.

이제 시장 가격의 변화를 살펴보도록 하자. 인센티브를 사전 공표할 때의 시장 가격 수준은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
P_d^*(I^*) &= e + f\{Q_d^*(I^*) + q_d^*(I^*)\} \\
&= e + \left( \frac{-(k+2)\det A}{\det C} \right) \cdot f Q_o + f \cdot \frac{(a_1f + a_2f - 2f^2 + \det A)}{\det C} I^*
\end{aligned} \tag{4.4.46}$$

인센티브가 제공되는 경우, 자율적 수요 반응 참여 상황의 시장 가격에 비교하여, 등식의 우변에 둘째 항이 추가되게 된다. 이 항은 음의 값을 가지게 되는 것을 볼 수 있는데 이에 따라 인센티브 제공 시, 시장 가격이 자율적 수요반응 참여 상황에서의 가격보다 하락하는 것을 확인할 수 있다.

다음 장에서는 시장 상황 별 시나리오들을 바탕으로 수치 대입을 통한 사례 연구를 통해 각 상황 별 시장 균형에 대한 분석 영향에 대해서 논의하도록 하겠다.

## 제 5 장 사례 연구

본 장에서는 앞서 분석한 시나리오 별 시장 균형 분석을 수치를 대입한 사례 연구를 통하여 시장 균형의 도출과 그로 인한 효과를 알아보도록 한다. 전 장에서 유도한 수요 반응의 효과를 다수의 발전 회사들과 수요 반응참여소비자, 그리고 일반참여소비자가 있는 상황을 다수의 참여자가 포함되었을 때의 상황을 사례 연구를 통하여 분석하도록 하겠다. 시장 균형을 살펴볼 시장 시나리오는 다음과 같이 구성하였다.

표 5.1 상정 시나리오들의 구분 및 설명

- |   |
|---|
| <ol style="list-style-type: none"><li>1) 완전 경쟁 시나리오<ul style="list-style-type: none"><li>- 시스템 내의 모든 참여자들은 가격 수용자로 행동한다.</li></ul></li><li>2) 과점 상황 시나리오<ul style="list-style-type: none"><li>- 시스템 내의 발전 회사들은 가격 결정자로 행동하고, 나머지 참여자들은 가격 수용자로 행동한다.</li></ul></li><li>3) 자율적인 수요 반응을 포함한 상황의 시나리오<ul style="list-style-type: none"><li>- 시스템 내의 발전 회사 및 수요반응참여소비자는 가격결정자로, 일반참여소비자는 가격 수용자로 행동한다.</li></ul></li><li>4) 인센티브를 사전 공표하는 시나리오<ul style="list-style-type: none"><li>- 시스템 내의 발전 회사 및 수요반응참여소비자는 가격결정자로서 후행 경기자가 되고, 일반참여소비자는 사회 후생을 최대화 하는 인센티브를 제공하는 가격결정자로서 선행 경기자가 된다.</li></ul></li></ol> |
|---|

각 시나리오들에 대해서 시장 균형과 그에 따른 결과를 어떠한 기준으로 비교 평가할 것인가는 매우 중요하다. 먼저, 사회 후생의 비교를 해보아야 한다. 왜냐하면, 모든 가격 결정자의 전략 행위에 의해 사회 후생의 감소는 예측이 되나, 그 수준이 어느 정도인지에 대한 확인이 필요하기 때문이다. 또한, 시장 가격의 비교도 필요하다. 본 논문에서의 가정은 여타 전력 관련 시장들을 배제하였으나, 연구의 확장 시, 에너지 시장 가격은 타 시장의 지표가 될 수 있는 요소이기 때문이다.

추가적으로 시나리오 별로 구해진 사회 후생의 구성 요소인 소비자 잉여와 생산자 잉여 값들의 비교가 필요하다. 이는, 각 시나리오 별 잉여 수치들을 서로 비교함으로써, 시장지배력 행사가 각 참여자들에게 얼마만큼의 잉여를 변화시켰는지 판단해볼 수 있기 때문이다. 이러한 양에 대한 판단과 더불어 이상적 상황과의 비교를 통한 분석도 필요한데 본 논문에서는 시장지배력에 대한 일반적인 측정지표로서, 러너 지수를 통하여 전력 시장 가격을 시나리오 별로 분석하면서 그 평가에 이용할 것이다[46, 47]. 러너 지수와 더불어, 소비자 잉여와 생산자 잉여, 그리고 사회 후생에 대한 시장지배력 행사를 지수화 한 평가 지표를 도입하여 각 시나리오 별로 어느 정도의 시장지배력 행사가 이루어졌는지에 대한 분석도 알아볼 것이다.

## 5.1 확장된 발전 및 수요 구성 하에서의 시장 균형

앞선 해석적인 분석 부분에서는 간단한 발전 및 수요 구성을 통하여 발전 회사들만이 가격 결정자가 되는 과점에서의 균형, 수요반응이 참여하는 상황에서의 균형, 그리고 인센티브가 사전 공표되는 상황에서의 균형을 분석해 보았다. 하지만, 2개의 발전 회사, 1개의 수요반응참여소비자 및 일반참여소비자의 구성은 현실 시스템에서의 구성과는 거리가 있다. 따라서, 현실과 비교한 사례 연구의 확장성을 더 검토하기 위하여 발전 회사의 수를 늘리는 방식으로 사례 연구를 진행하여 전략 행위와 그 결과를 분석해보고자 한다. 좀 더 현실적인 사례 연구를 위해 발전 회사의 수를 늘리긴 하였으나, 본 사례 연구는 다음과 같은 한계를 지니고 있다. 첫 째로, 역수요 함수의 가정을 단조 감소하는 1차의 함수로 모델링 하였다는 점이다. 이는 소비자의 효용 수준의 증가를 같은 수준의 기울기로 두었다는 점에서 실제와 거리가 있다. 둘째로, 발전 함수 모델링이 첫 번째 한계로 인하여 모의용 발전 함수 계수를 사용하였다는 점이다.

이제 사례 연구의 내용으로 넘어가도록 하겠다. 본 사례 연구에서는 여섯 개의 발전 회사와 수요반응참여소비자, 그리고 일반참여소비자로 구성된 시스템의 모의를 통해 사례 연구를 하였다.

발전기들의 변수에 대한 정보들은 표 5.2 과 같다.

표 5.2 사례 연구에 이용된 발전기들의 정보

	$c_i$ (\$)	$b_i$ (\$/MW)	$a_i$ (\$/MW <sup>2</sup> )	$P_{\max}$ (MW)	$P_{\min}$ (MW)
발전기 1	0	10	0.15	130	0
발전기 2	0	18	0.15	100	0
발전기 3	0	15	0.2	80	0
발전기 4	0	25	0.3	50	0
발전기 5	0	30	0.6	30	0
발전기 6	0	32	0.83	25	0

본 발전기 데이터들은 수요 반응이 가격 결정자들의 전략 결정에 미치는 영향을 연구한 [26]의 데이터를 바탕으로 일부를 수정하여 사용하였다. 발전 데이터의 구성은 발전 함수의 2차항과 1차항이 둘 다 상대적으로 작은 값을 가지는 발전기(기저발전기)와 중간 부분을 담당하는 발전기, 그리고 타 발전기보다 비싼 발전 비용을 가지는 발전기(피크 발전기)로 가정하여 구성하였다. 각 발전 회사들은 하나의 발전기를 소유하고 있다. 즉, 발전회사 1,2는 기저를 담당하고, 발전 회사 3,4는 중간 부분을, 그리고 발전 회사 5와 6은 피크 발전기를 가지고 있는 것으로 가정하였다. 이러한 발전 구성을 도모한 이유는 특정 발전 회사가 다른 발전 회사가 가격 결정에 있어서 큰 영향을 주는, 시장 지배력을 더 많이 가지고 시장에 입찰하는 상황을 구성하기 위함이다.

수요의 입찰 함수의 경우, 단조 감소하는 일차 함수의 형태로 가격에

반응하는 소비자의 특성을 모델링 하였다.

표 5.3 역수요 함수의 정보

	전체수요 (MW)	기울기	가격 축 절편 (\$/MWh)
Demand	377.27	-0.2	75.454

전체 수요량은 377.27MW 으로 설정하였고, 역수요 함수의 기울기의 경우,  $-0.2$ 로 설정하였다. 이러한 기울기의 산정은 기준 가격(Reference Price)와 그에 해당하는 부하를 통해 구할 수 있는 가격 탄력성을  $-0.838$ 로 설정한 결과에서 나온 것이다. 탄력성은 엄밀한 의미에서 모든 부하들에 대한 가격 민감도를 동일한 수준으로 반영하지는 않기 때문에, 본 논문에서는 기울기 수준을 바탕으로 비교분석을 진행하였다. 또한, 수요반응참여소비자의 소비자 잉여 비율인  $k$ 는  $0.1$ 로 정하고, 이에 따른 최대 수요반응 가능량은 완전 경쟁의 청산 량과  $\sqrt{k}$ 의 곱으로 설정하였다. 이는 수요 자원이 이용되면, 가장 낮은 효용의 수요를 이용한다는 가정에 근거하여 설정한 것이다. 상기 시스템의 발전 및 수요의 구성을 바탕으로 시나리오를 나누어 시장 균형에 의한 결과를 모의하였다.



### 5.1.1 완전 경쟁 시나리오에서의 시장 균형 결과

타 시나리오들에서 얻어지는 시장 균형 결과와의 비교를 위해 완전 경쟁에 대한 시나리오를 우선적으로 모의하였다. 완전 경쟁 시나리오에서의 결과는 시장지배력이 행사되지 않는 상황에서의 시장 균형 결과를 가지게 된다. 즉, 모든 발전기가 가격 수용자라는 가정하에서의 시장 균형에 대한 결과이며, 다음과 같다.

표 5.4 완전 경쟁 시나리오 시장 균형 결과

	발전량(MWh)	생산자잉여(\$)	소비자잉여(\$)	시장가격(\$/MWh)	사회후생(\$)
발전회사1	81.332	992.237		34.4	6208.108
발전회사2	54.665	448.246			
발전회사3	48.499	470.432			
발전회사4	15.666	73.628			
발전회사5	3.666	8.065			
발전회사6	1.446	1.734			
DR 소비자			421.377		
일반소비자			3792.389		
총계	205.275	1994.342	4213.765	34.4	6208.108

상기 표는 완전 경쟁 시나리오에서의 시장 균형의 결과이다. 전체 발전량은 205.275MWh 로 결정되었으며, 이에 따른 시장 가격은 34.4\$/MWh 이다. 모의를 위한 발전 구성을 고려하였을 때, 기저를 담당하는 발전기 1,2의 청산량은 상대적으로 많은 결과를 나타내었으며, 발전기 3,4는 중간 수준의 발전량, 그리고 비싼 비용의 발전기 5,6은 매우 적은 발전량을 가지고 있다.

사회 후생은 6208.108\$로 결정되었고, 이의 구성은 1994.342\$의 총 생산자 잉여와 4213.765\$의 총 소비자 잉여로 구성되어 있다. 이는, 발전에 비해 소비자 잉여가 상대적으로 큰 값을 가지는 실제의 상황을 좀 더 반영하기 위한 결과를 상정한 것이다.

### 5.1.2 과점 상황 시나리오에서의 시장 균형 결과

앞선 절에서는 이상적 상황인 완전 경쟁 시나리오의 시장 균형 결과에 대하여 알아보았다. 본 절에서는 여섯 개의 발전 회사들이 모두 가격 결정자로서 행동하고, 수요는 모두 가격 수용자로 행동하는 과점 상황 시나리오에 대하여 모의해본다.

표 5.5 과점 상황에서의 시장 균형 결과

	발전량(MWh)	생산자잉여(\$)	소비자잉여(\$)	시장가격(\$/MWh)	사회후생(\$)
발전회사1	60.214	1269.024		40.107	6016.81
발전회사2	44.214	684.222			
발전회사3	41.845	700.415			
발전회사4	18.884	178.304			
발전회사5	7.219	41.696			
발전회사6	4.359	19.568			
DR소비자			312.358		
일반소비자			2811.223		
총계	176.737	2893.229	3123.581	40.107	6016.81

상기 표는 과점 상황 시나리오에서의 시장 균형 결과이다. 전체 발전량은 176.737MWh 로 결정되었으며, 이에 따른 시장 가격은 40.107\$/MWh 이다. 이를 완전 경쟁 시나리오의 값들과 비교하게 되면, 청산된 발전량은 28.538MWh 만큼 감소하게 되었고, 시장 가격은 5.707\$/MWh 만큼 증가하게 되었다. 다시 말하면, 가격 결정자가 되는 발전 회사들의 이윤 최대화를 위한 용량 철회 행위에 의하여 총 균형발전량이 줄고, 시장 가격은 높아지는 결과를 가져오게 되었다. 발전 회사 별로 발전량을 살펴 보게 되면, 발전 회사 1,2,3 의 경우, 즉, 발전

비용이 낮은 발전 회사들은 자신의 용량을 완전 경쟁에 비하여 일부를 철회하여 가격 상승을 유도하였다. 이에 비해 발전 회사 4,5,6 의 경우, 자신의 발전량은 되려 증가하게 되었다. 이를 다시 말하면, 발전 회사 1,2,3 은 자신의 용량을 철회하여 상대적으로 비싼 비용을 가지는 발전 회사 4,5,6 의 발전기를 시장에 낙찰되게끔 하여 단일 가격으로 청산 되는 전력 시장에서의 가격을 높이는 역할을 하게 된다. 발전 회사 4,5,6 의 경우도 자신의 발전량의 결정을 할 때에 다른 발전 회사들의 행위를 인식하고, 자신의 이윤 최대화를 위한 최적화 과정에서 자신의 발전량을 늘렸기 때문에 이들도 역시 시장 지배력을 행사하였다고 볼 수 있다. 이는 그들의 생산자 잉여를 완전 경쟁 시나리오와 비교하였을 때 극명하게 나타난다고 할 수 있다. 과점 상황 시나리오에서의 총 생산자 잉여의 값은 2893.229\$로서 완전 경쟁에서의 잉여와 비교하였을 때, 898.887\$ 만큼 증가하게 된다. 이 증가 분에서 각 발전 회사들의 생산자 잉여를 살펴보면, 자신의 용량을 철회하여 시장 지배력을 발휘한 발전회사 1,2,3 의 잉여가 증가하였다. 이와 더불어, 자신의 발전량을 철회하지 않고 되려 늘린 발전 회사 4,5,6 의 경우도 자신의 생산자 잉여가 완전 경쟁 시나리오와 비교하여 증가하였음을 알 수 있다. 이들의 생산자 잉여 증가 분은 소비자 잉여로부터 이전된 것이라 분석할 수 있는데 이를 위해 소비자 잉여를 살펴보자. 과점 상황 시나리오에서의 소비자 잉여는 3123.581\$로서 완전 경쟁과 비교하였을 때,

1090.18\$ 만큼 감소하게 되었다. 이를 발전 회사의 총 생산자 잉여 증가와 비교하게 되면, 191.293\$ 만큼의 후생 손실 분이 발생하게 되는데 이는 앞선 장에서 언급한 시장지배력 행사로 인해 발생하는 Dead-weight loss 분이다. 즉, 소비자 잉여의 일부는 생산자 잉여로 이전되고, 일부는 그대로 상실되어 전체적인 사회 후생 면으로 보았을 때 손해를 입게 되는 것이다. 그렇다면, 자율적인 수요 반응 참여자를 개입시켜 시장지배력을 완화할 수 있는지를 살펴보자.

### 5.1.3 자율적 수요반응을 포함한 상황에서의 시장 균형 결과

앞선 절에서는 과점 상황에서의 시장 균형에 대한 결과에 대하여 알아보고, 완전 경쟁과 비교하여 보았다. 본 절에서는 여섯 개의 발전 회사들이 모두 가격 결정자로서 행동하고 수요는 수요반응참여소비자가 가격결정자로 행동하며, 일반참여소비자는 가격 수용자로 행동하는 시나리오에 대하여 모의해본다. 본 게임은 일곱의 가격 결정자가 동시에 참여하는 게임으로서 그 균형점은 역시 쿠르노 균형의 값으로 구해낼 수 있다. 달라진 점이 있다면, 수요반응참여소비자에 의해서 역수요 함수의 변화를 통한 시장 가격의 변화를 고려한 쿠르노 균형점이라는 점을 주목하여야 한다.

표 5.6 자발적 수요 반응을 포함한 상황에서의 시장 균형 결과

	발전량(MWh)	생산자잉여(\$)	소비자잉여(\$)	시장가격(\$/MWh)	사회후생(\$)
발전회사1	58.913	1214.749		39.456	5957.802
발전회사2	42.913	644.526			
발전회사3	40.761	664.571			
발전회사4	18.07	163.271			
발전회사5	6.755	36.499			
발전회사6	4.009	16.553			
DR소비자	8.571 (DR)		308.54		
일반소비자			2909.093		
총계	171.42	2740.168	3217.633	39.456	5957.802

상기 표는 자발적 수요 반응을 포함한 상황에서의 시장 균형 결과이다. 전체 발전량은 171.42MWh로 결정되었으며, 이에 따른 시장 가격은 39.456\$/MWh이다. 이를 과점 상황 시나리오와 비교하여 보자. 먼저, 총 균형 발전량은 5.317MWh 만큼 감소하게 되었고, 시장 가격 또한, 0.651\$/MWh 만큼 감소하게 되었다. 본 시나리오에서는 과점 상황 시나리오와 비교하여 별도 수요 반응의 참여로 인하여 가격 결정 수준을 일부 하락 시키는 결과를 가져 왔는데 이는 가격 결정자의 수 증가에

따른 시장 지배력 행사 완화의 효과에 의해서 시장 가격이 하락하였다고 할 수 있다. 여기에서 주목하여야 할 점은 발전 회사들의 전략 행위에 따른 총 균형 발전량 감소 분이다. 수요 반응의 자발적인 참여로 인하여 시장 가격이 하락하는 것을 고려하였을 때 시장 지배력이 완화되었다고 말할 수 있지만, 총 균형 발전량이 감소 되었다는 것은 발전 회사들이 수요 반응 참여에 의한 대비책으로 과점 상황에서의 발전량에 비하여 용량 철회량을 증가시키거나 또는 추가 입찰량을 줄이는 행위를 했다고 분석할 수 있다. 이제 개별 발전 회사들의 발전량을 살펴보도록 하자. 이들의 생산자 잉여는 과점 상황 시나리오에 비교하여 그 값들이 전부 감소하였다. 하지만 그 수치는 완전 경쟁의 그것보다 크며, 용량 철회를 통한 시장 가격 증가를 여전히 자신들의 이윤 최대화를 위하여 이용하고 있다는 뜻이 된다. 이는, 수요 자원을 가진 소비자들이 일부 시장 지배력을 완화시킬 수 있지만, 시장지배력의 행사를 모두 억제하지는 못한다는 것이다.

이제 발전 회사들의 생산자 잉여를 살펴보도록 하자. 전체 생산자 잉여는 2740.168\$로서 과점 상황 시나리오에서의 총 생산자 잉여와 비교하여 153.061\$ 만큼 감소하게 되었다. 이에 비해 소비자 잉여의 경우, 94.052\$ 만큼의 잉여가 증가하게 되었다. 이는 발전 회사의 잉여 감소 분 중, 일부는 소비자들에게 이전되었지만, 일부는 사라지게 되었음을 의미한다. 수요 반응에 의해서 용량 철회라는 전략 변화 없이

자신의 용량을 절감하여 시장 지배력 완화에 대응한 발전 회사들의 전략이 그대로 유지되었기 때문에 이러한 손실분이 발생하게 되는 것이다. 개별 소비자들의 소비자 잉여를 살펴보면, 수요반응 참여 소비자의 경우, 312.358\$ 에서 308.54\$로 잉여가 되려 감소하게 된다. 이는, 수요 반응 참여 소비자의 참여 사실을 발전 회사들이 인지하고 있으며, 이에 따라 전략을 짜기 때문에 수요 반응 참여자는 되려 수요 반응을 행하고도 자신의 잉여가 감소하는 결과를 얻게 되는 것이다. 그렇다고 수요 반응을 하지 않을 경우에는 자신의 잉여 최대화 문제의 해가 아닌 다른 값을 취하는 것이기 때문에 선택하는 안이 될 수 없다. 따라서, 과점의 결과가 수요 반응 시행자 입장에서는 더 나은 선택이 되기 때문에 수요 반응을 시행하지 않게 되는 결과를 원하게 된다. 본 사례 연구에서는 이미 수요반응참여소비자가 자율적 수요반응에 참여하고 있다는 가정 하에 결과를 도출한 것이며, 해당 프로그램에 참여 여부를 결정하는 상황에서는 과점의 잉여보다 낮은 값을 취하기 때문에 해당 프로그램에 참여하지 않게 된다. 일반참여소비자의 경우, 그들의 잉여는 과점 상황 시나리오의 그 것과 비교하여 증가하게 되었는데, 이는 일반참여소비자가 시장 균형의 결정에서 손해 본 항목 없이 시장 가격이 하락하였기 때문에 아무런 행동 없이 이윤이 상승하는 무임 승차(Free-riding)를 하게 된다. 하지만, 그 잉여 증가량이 수요 반응 참여 소비자가 잃게 되는 잉여 분에 비해 값이 크게 되어 전체 소비자 잉여가 증가하는 결과를 얻게



되었다.

결론적으로 수요 반응 참여자의 자발적인 수요 반응으로 발전 회사들의 용량 철회 전략을 일부 수정 시켜, 수요 반응에 의한 시장 가격 감소 효과와 일반참여소비자의 잉여의 증가를 노릴 수 있지만 그 양이 많지 않으며, 수요반응참여소비자들의 잉여를 감소시킬 수도 있다.

#### 5.1.4 인센티브를 사전 공표하는 시나리오에서의 시장 균형 결과

앞선 절에서는 자율적 수요 반응을 포함한 상황에서의 시장 균형에 대하여 알아보고, 이를 과점 상황과 비교하여 수요반응참여소비자의 추가가 어떠한 영향을 미치게 되는지에 대해서 알아 보았다. 수요 반응 참여자가 자율 참여를 하게 되는 상황에서는 발전 회사 또한 이를 인지하고 전략을 수정하기 때문에 수요 반응 참여자의 잉여가 과점 상황 시나리오보다 감소함을 확인할 수 있었다. 하지만, 시장 가격이 감소하고, 일반참여소비자의 잉여가 증가됨으로써 과점 상황에 비하여 상대적으로 소비자에게 더 많은 잉여를 가져다 줄 수 있었다. 수요 반응 참여자의 이윤 최대화 행동에 의해 시장지배력 완화 효과가 나타난 것이다. 시장지배력 완화 효과를 좀 더 가져 오기 위해서는 수요반응 참여소비자의 이윤을 보전해줄 필요가 있다. 왜냐하면, 앞선 예제에서 본 바와 같이 수요 자원이 전일 에너지 시장에 참여한다는 정보만으로도

발전 회사들은 전략을 수정하여 자발적 수요반응참여소비자의 이윤이 과점 상황에서의 그것보다 작게 나타날 수 있기 때문이다. 따라서, 수요 반응참여소비자들의 시장으로의 유도가 아예 가능하지 않을 경우가 발생할 수도 있다. 인센티브를 사전에 공표하는 방법은 인센티브를 통해 이러한 희생 부분을 보완해주어 실제 수요 반응을 가능하게 해주고, 소비자 잉여의 수복 부분에서 좀 더 나아진 결과를 보이는 장점을 가지고 있다.

본 절에서는 여섯 개의 발전 회사들이 모두 가격 결정자로서 행동하고, 수요는 수요반응참여소비자가 가격결정자로 행동하며, 이러한 전일 에너지 시장 입찰 이전에 시장 운영자가 인센티브를 공표하여 유도하는 방식을 가진 시나리오에 대하여 모의해본다.

본 시나리오에서의 균형은 이론 부분에서 유도한 슈타켈버그 모형으로 시장 균형을 도출할 수 있다. 선행 전략의 결정자는 사회 후생을 최대화하려는 시장 운영자이고, 후행 경기자는 전일 에너지 시장에 참여하게 되는 발전회사들과 수요반응참여소비자 이다. 앞서 언급한 바와 같이, 본 게임은 순차 게임이면서, 후행 경기자들끼리는 서로의 전략 값을 알 수 없는 게임인 쿠르노 게임을 행한다. 후행 경기자들의 쿠르노 게임에 의한 균형을 바탕으로 시장 운영자는 시장 가격, 총 발전량, 수요 반응 량 등을 고려한 인센티브 산정을 통해 후행 경기자들의 전략을 조정하는 슈타켈버그 게임을 수행한다.

표 5.7 인센티브의 사전공표 시나리오에서의 시장 균형 결과

	발전량	생산자잉여	소비자잉여	DR인센티브	시장가격	사회후생(\$)
	(MWh)	(\$)	(\$)	(\$/MWh)	(\$/MWh)	
발전회사1	57.687	1164.728		3.328	38.844	5868.066
발전회사2	41.687	608.233				
발전회사3	39.739	631.681				
발전회사4	17.304	149.721				
발전회사5	6.317	31.922				
발전회사6	3.679	13.943				
DR소비자	16.641		332.322			
	(DR)					
일반소비자			2935.515			
총계	166.414	2600.228	3267.838	3.328	38.844	5868.066

상기 표는 인센티브를 사전 공표하는 시나리오에서의 시장 균형 결과이다. 전체 발전량은 166.414MWh로 결정되었으며, 이에 따른 시장 가격은 38.844\$/MWh이다. 이를 과점 상황 시나리오와 비교하여 보자. 총 균형 발전량은 10.323MWh 만큼 감소하게 되었고, 시장 가격은 7.53\$/MWh로 감소했음을 볼 수 있다. 본 시나리오에서는 자발적 수요 반응 참여 시나리오와 마찬가지로 과점 상황 시나리오와 비교하여 수요 반응의 참여로 인하여 균형 가격 결정 수준을 하락 시키는 결과를 가져

왔는데 이는 가격 결정자의 수 증가에 따른 시장 지배력 행사 완화의 효과, 시장 가격에 영향을 주는 인센티브가 사전에 공표된다는 점들이 합쳐져 시장 가격이 하락하였다고 할 수 있다. 총 균형 발전 량이 감소한 이유는 수요 반응에 의한 가격 감소에 의해 시장 균형점이 변하였기 때문이다.

이제 개별 발전 회사들의 발전량에 대해서 살펴보도록 하자. 발전 회사의 경우, 과점 상황 시나리오 및 자율적 수요반응이 참여하는 시나리오와 비교하여 균형발전량이 더 줄어든 값을 나타내었다. 이와 같은 결과는 앞선 모델링 부분에서 설명한 바와 같이 인센티브의 수준이 증가함에 따라서 발전량이 감소하게 된다는 특징으로 설명할 수 있다. 이는 발전 회사들이 시장지배력을 가지고 있고, 인센티브를 통해 시장 운영자가 시장지배력 행사를 완화하기 위한 적정인센티브를 책정했음에도 불구하고, 경기자 수의 부족으로 인하여 일부 행사하게 됨으로써 나타나는 결과라고 할 수 있다.

전체 생산자 잉여를 살펴보게 되면, 2600.228\$ 로서, 2893.229\$ 였던 과점 상황, 2740.168\$ 였던 수요반응 참여 상황에 비하여 그 수준이 줄어들게 되었음을 알 수 있다. 이는, 시장 지배력 행사는 남았지만, 과점 균형에서의 결과와 비교하였을 때, 시장 지배력이 완화 되었다고 할 수 있다. 왜냐하면, 발전 회사들이 시장지배력 행사로 소비자로부터 전이시킨 잉여의 양이 줄었기 때문이다. 이제, 개별 발전 회사들의 결과를 보면,

균형 발전량 감소 및 시장 가격 감소에 의한 생산자 잉여의 감소를 나타내었는데, 완전경쟁에서의 그것들에 비교하여 과도하게 가져갔던 생산자 잉여 수준에 비교하여 큰 폭으로 줄어들었음을 볼 수 있다. 특히, 균형 발전량 결정에 있어서 많은 비중을 차지하는 발전 회사일수록 더 많은 생산자 잉여 감소가 이루어졌다. 하지만, 그 수준은 모두 완전 경쟁에서의 수치보다는 높게 나타나는 결과를 보임으로써, 여전히 시장지배력 행사에 의한 추가 잉여는 누리고 있음을 알 수 있다.

이제 소비자 잉여의 변화에 대해서 살펴보도록 하자. 총 소비자 잉여는 3267.838\$ 로, 과점 상황에서의 결과인 3123.581\$ 에 비하여 144.257\$ 만큼 증가하게 되었다. 여기에서 중요한 것은 개별 소비자 잉여의 구성이 어떻게 되는 것인가 이다. 수요반응참여소비자의 경우, 332.322\$의 잉여를 가지게 되는데, 이는 기존의 발전회사들만 가격결정자가 되는 과점 상황에서의 잉여인 312.358\$ 와 자율적 수요 반응 참여 시나리오의 잉여인 308.54\$ 와 비교하여 보았을 때, 더 큰 값을 가지게 된다. 특히, 자율적 수요 반응참여 시나리오에서의 잉여는 과점에서의 그것 보다 낮은 수준이었기 때문에 수요자원 보유자는 수요반응을 하고도 손해를 보는 상황이 발생했으나, 인센티브를 통한 보전 이후에는 더 큰 값을 가지기 때문에 수요 반응을 위한 유인책을 충분히 제공할 수 있다.

또한, 완전 경쟁에서의 잉여 값인 421.377\$와 비교하면, 더 적은 값을 가지는 것을 알 수 있다. 이를 다시 이야기 하면, 적정 인센티브를 사전 공표하는 수요 반응을 이용할 때의 사회 후생 최대화 과정은 수요 반응 참여 소비자에게 인센티브를 제공하긴 하되, 시장 균형의 결과가 완전 경쟁의 수준을 넘지 않는 선에서 결정한다는 것을 알 수 있다.

이제 일반참여소비자의 잉여에 대해서 분석하도록 하겠다. 적정 인센티브의 사전 공표를 포함한 상황의 시장 균형에서의 그들의 잉여의 값은 2935.515\$로서 과점 상황에서의 값인 2811.223\$와, 수요 반응 참여를 포함한 상황에서의 값인 2909.093\$와 비교하였을 때, 그 값이 증가하였음을 알 수 있었다. 이는, 수요 반응을 위한 인센티브 제공에 의해 입게 되는 손실분을 고려하여도 그 수치가 증가한 것이다. 가격 결정자들의 용량 철회를 통한 과점 균형 유도에서 벗어나 시장 가격이 낮은 수준으로 결정되면서, 일반참여소비자의 경우, 그 잉여가 증가하게 된다. 하지만, 이 값은 완전 경쟁 가정 시나리오에서 얻을 수 있는 일반참여소비자의 잉여인 6748.848\$에 비교하여 낮은 값을 보이게 되는데, 이는 발전 회사가 전략을 수정하였어도 여전히 시장 지배력을 행사하고 있음을 보여주는 것이라고 할 수 있다.

이제까지 상황 별 시장 균형 결과를 가지고 분석을 통하여 그 효율성에 대해서 알아보았다. 다음 장에서는 여러 지수 값을 통하여 후생의 분배 적절성과 시장 지배력 억제 정도를 나타내 보려 한다.

### 5.1.5 시장 지배력 행사 정도의 평가

본 절에서는 앞서 연구하였던 사례에 대하여 여러 지수들을 통하여 시장지배력 완화가 과연 적절히 이루어 졌는지에 대해 알아보려 한다.

먼저, 전통적인 시장 지배력의 측정 지수인 러너지수(Lerner Index) 를 통하여 그 정도를 알아보도록 하겠다. 러너 지수는 시장지배력을 측정하는 지수로서, 시장 청산 가격의 수준과 한계 가격의 비율을 나타내는 지수이다. 러너 지수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$L = \frac{P - MC}{P}$$

$L$  : 러너 지수

$P$  : 제품의 판매 가격

$MC$  : 제품의 한계 가격

러너 지수의 의미는 시장 가격 상승분(Mark-up)을 시장가격에 대해 퍼센트 수치로 나타낸 것으로 시장가격과 비교하여 한계 비용이 몇 % 수준인가를 나타내는 척도로 해석할 수 있다. 수식적인 의미에서 러너 지수는 독점적 시장지배력 행사를 가정하고, 한계 수익이 한계 비용과

같이지는 지점에서 식을 유도하여, 지수가 수요의 탄력성의 역수 값을 가지는 것으로 설명할 수 있다.

전력 시장에 이 지수를 도입하고 분석하는데 있어서, 관련 선행 연구들은 관측되는 시장 가격을 제품 판매 가격으로, 한계 발전기의 비용 수준을 제품의 한계 가격으로 고려하여 평가를 시도한다[48]. 이는, 과점 시의 시장 가격과 완전 경쟁 가정 하의 시장 가격을 통해 전력 시장의 시장지배력을 분석한 것이라 할 수 있다. 따라서, 본 논문 또한, 이러한 맥락에서 러너 지수를 사용한 분석을 시도하려 한다.

이와 더불어, 앞선 절에서 말한 바와 같이 수요 반응을 위한 적정 인센티브를 사전에 공표하는 방법이 소비자의 잉여와 생산자의 잉여를 어떻게 배분하였는지를 측정하는 것도 중요하다. 만약, 시장 지배력을 완화하는 방법이 존재하여 얻어진 전체 잉여를 특정 참여자에게 치우쳐 분배를 수행한다고 하면, 이는 시장 지배력 완화라는 취지에서 벗어나는 방법론이라고 할 수 있다. 이를 위해서는 사회 후생 분배의 이상적인 상황이 어떤 분배를 이루는 것이냐를 정해야 할 필요가 있다. 적절한 사회 후생 분배의 기준점을 정하기 위해서는 모든 참여자가 가격 수용자로 행동하는 상황에서의 분배가 가장 공정한 사회 후생의 분배라고 생각할 수 있다. 따라서, 전력 시장에서의 공정한 사회 후생 분배는 가격 수용자로 행동하는 발전 자원을 통한 비용 최소화 문제, 또는 사회 후생의 최대화를 시장 운영자 입장에서 푼, 완전 경쟁에서의 값들을



기준으로 삼아야 한다고 할 수 있다.

이를 바탕으로, 잉여 분배의 정도를 평가하기 위해서는 각 시나리오 별로 소비자 잉여 및 생산자 잉여의 변화 정도에 대한 분석이 필요하다. Ettore Bompard 는 [26, 27]에서 CSDI(Consumer surplus deviation index) 와 PSDI(Producer surplus deviation index) 등의 지수들을 제안하였다. 이 지수들은 전력 시장 평가에 적용된 러너 지수의 의미를 바탕으로 하여 고안된 지수들이다. 시나리오 별 소비자 및 생산자 잉여가 과연 완전 경쟁에 비하여 몇 % 정도의 차이가 있는가에 대한 고찰로 제안된 지수이다. 따라서, 본 논문에서의 잉여 분배의 공정성 평가를 위해 이 지수들이 적합하다고 판단한바, 도입하여 각 시장 상황 별 결과값들에 대하여 평가하였다. 다만, 참고 문헌에서의 각 지수들은 큰 의미에서 러너 지수의 의미를 담고는 있으나, 분모 부분을 완전 경쟁에서의 잉여로 두고 분석하였다는 보완점이 있다. 따라서, 러너 지수의 기본 원리에 대해 충실히 반영키 위해 분모부분을 해당 시나리오의 잉여 값으로 설정하여 각 평가 지수를 결정하였다.

생산자 잉여 차이를 나타낸 지수 PSDI 와 소비자 잉여 차이를 나타낸 지수 CSDI 는 다음과 같이 표현 될 수 있다.

Producer surplus deviation index (PSDI):

$$PSDI = \left( \sum_g S_g^{GE} - \sum_g S_g^{GP} \right) / \sum_g S_g^{GE}$$

Consumer surplus deviation index (CSDI):

$$CSDI = \left( \sum_d S_d^{GE} - \sum_d S_d^{GP} \right) / \sum_d S_d^{GE}$$

각 지수 별로 분모에 들어가는 값은 해당 시나리오에서의 생산자잉여( $\sum_g S_g^{GE}$ ) 혹은 소비자의 잉여( $\sum_d S_d^{GE}$ )를 나타내며, 분자에 들어가는 것은 해당 시나리오에서의 생산자 혹은 소비자 잉여와 이상적인 상황인 완전 경쟁에서의 생산자잉여( $\sum_g S_g^{GP}$ )와 소비자잉여( $\sum_d S_d^{GP}$ )의 그것들과의 차로 구성되어 있다. 러너 지수와 마찬가지로, 이 지수들은 그 수치가 0에 가까운 값일수록, 이상적인 상황에서의 결과에 근사 한다는 의미가 된다. 러너 지수와 다른 점은 CSDI 및 PSDI 가 음의 값을 가질 수 있다는 것이다. 음의 값을 가지게 되는 경우, 시장 지배력의 행사에 의해 잉여가 감소하게 되고 양의 값을 가지게 되는 경우 증가한다는 의미가 된다. 가장 이상적인 잉여 분배 상황을 완전 경쟁에서의 결과로

가정한 것을 생각하였을 때, CSDI 및 PSDI는 0에 가까운 값을 가질수록 시장지배력 행사가 완화되었다고 평가할 수 있다.

이제 도입한 지수들을 바탕으로, 상기 사례 연구에 적용하여 전체 PSDI, 개별 발전 회사 별 PSDI 를 살펴보면 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

표 5.8 과점 상황에서의 PSDI

	발전회사1	발전회사2	발전회사3	발전회사4	발전회사5	발전회사6
$PSDI_i$	0.218	0.345	0.328	0.587	0.807	0.911
$PSDI$	0.311					

표 5.9 자율적 수요반응을 포함한 상황에서의 PSDI

	발전회사1	발전회사2	발전회사3	발전회사4	발전회사5	발전회사6
$PSDI_i$	0.183	0.305	0.292	0.549	0.779	0.895
$PSDI$	0.272					

표 5.10 인센티브의 사전 공표 시나리오에서의 PSDI

	발전회사1	발전회사2	발전회사3	발전회사4	발전회사5	발전회사6
$PSDI_i$	0.148	0.263	0.255	0.508	0.747	0.876
$PSDI$	0.233					

상기 표 5.8, 5.9, 5.10 은 각 시나리오 별로 발전 회사 별 PSDI를 구한 값이다. 먼저, 과점 상황에서의 지수를 보게 되면, 발전 회사 1,2,3 의 경우, PSDI 가 0.5보다 작은 값을 가지고 있다. 이는 기본적으로 해당 발전회사의 비용이 낮게 잡혀 있고, 그만큼 낙찰되는 양이 많기 때문에 변동 폭은 상대적으로 작은 값을 가지고 있다고 설명할 수 있다. 이에 반해 발전 회사 4,5,6 의 경우, 발전 회사 1,2,3 과 비교하여 상대적으로 큰 값을 가지고 있다. 이는, 이들의 낙찰된 양이 적은 원인에서 기인한다. 이와 같이 발전 회사 4,5,6 은 얻게 되는 생산자 잉여의 크기가 타 발전 회사들에 비해 매우 작은 수준이기에 총 생산자 잉여의 PSDI를 살펴보았을 때, 그 수치는 0.311으로 얻어지게 되었다.

수요 반응을 포함한 과점 상황에서의 PSDI는 일반 과점 상황에서의 수치보다 모든 부분에서 낮은 값을 가지는 결과를 보여주었다. 전체 PSDI 도 0.272로 크게 감소함을 볼 수 있다. 또한, 발전 회사 낮은 발전 비용을 가지고, 생산자 잉여에서 많은 부분을 차지하는 발전 회사일수록 적은 부분을 차지하는 발전 회사에 비교하여 PSDI 의 감소량이 더 적음을 볼 수 있다. 이는, 가격 감소에 의해 수익이 감소하는 용량이 더 적기 때문이다.

이제 적정 인센티브 사전 공표를 통한 시장 균형 도출 시나리오에서의 PSDI를 살펴보도록 하자. 개별 발전 회사의 PSDI 는 과점 시나리오들과 비교하여 많게는 0.082까지 감소하게 되었다. 이러한 감소 현상은 발전

회사 1,2,3,4 에 두드러지게 나타나는데, 이러한 이유는 첫째로 시장 가격이 낮아지게 되는 것과, 둘째로 철회하는 용량이 줄어들게 되는 두 가지 요인에 기인한다. 발전 회사 1,2,3,4 와 같은 경우, 이 두 가지 요인에 영향을 크게 받기 때문에 그 결과로 시장지배력 행사로 인한 발전 회사의 추가 이윤 분이 줄어들게 되어 PSDI 가 급격히 낮아지는 결과로 이어지게 된 것이다. 개별 발전 회사의 PSDI 수치 중, 발전 회사 5,6 의 수치가 가장 높은 수치를 나타내는 점에 주목하여야 하는데, 이들의 수치는 타 발전 회사들보다 높은 값을 가지는 것을 알 수 있다. 수요반응 도입으로 인한 변동폭 또한 작다. 이는, 용량 철회를 통한 시장지배력 행사를 피하는 발전회사 잉여는 많이 줄어들었음에도 전략 행위에 의해 추가 발전을 한 발전 회사들에게는 잉여의 대규모 감소는 없다는 것을 보여준다.

전체 PSDI 값 또한, 과점 경쟁 시나리오 및 자율적 수요반응 참여 시나리오의 값에 비교하여 줄어들었음을 확인할 수 있었다. 총 생산자 잉여 또한, 인센티브 제공에 의한 수요 반응에 의해서 감소하였으며, 시장지배력이 완화되었음을 나타낸다.

이제 소비자들의 잉여 변화에 대한 지표인 CSDI 를 살펴보도록 하자.

표 5.11 과점 상황에서의 CSDI

	수요반응참여소비자	일반참여소비자
$CSDI_t$	-0.349	-0.349
$CSDI$	-0.349	

표 5.12 자율적 수요반응을 포함한 상황에서의 CSDI

	수요반응참여소비자	일반참여소비자
$CSDI_t$	-0.366	-0.304
$CSDI$	-0.310	

표 5.13 인센티브의 사전 공표 시나리오에서의 CSDI

	수요반응참여소비자	일반참여소비자
$CSDI_t$	-0.268	-0.292
$CSDI$	-0.289	

상기 표들은 각 시나리오 별로 소비자들의 CSDI 를 구한 값이다. 먼저 표 5.11 의 과점 상황에서의 지수들을 살펴보게 되면, 두 소비자가 같은 CSDI 값을 가지고 있음을 볼 수 있다. 이는, 그들의 소비자 잉여 값의 절대적 크기에 관계 없이 발전 회사들의 전략행위에 의해 동일한 비율의 잉여 감소를 겪고 있음을 나타낸다. 과점 상황 시나리오에서는

수요반응참여소비자와 일반참여소비자를 구분 없이 모두 가격 수용자로 설정하고 모의하였기 때문에 이와 같은 결과를 나타낸다고 결론지을 수 있다. 전체 CSDI 는  $-0.349$  로 개별 소비자들의 지수와 같은 값을 나타낸다. 이는, 상기한 바와 같이 소비자 구분 없이 모의한 결과와 궤를 같이 한다.

이제 자율적 수요반응 참여 상황의 지수들을 살펴해보도록 하자. 수요 자원 미포함 과점 상황과의 수치들과 비교하였을 때, 수요반응참여 소비자의 CSDI는  $-0.366$  로서  $0.015$ 만큼 감소하였고, 일반참여소비자의 CSDI 의 경우,  $-0.304$  로서 그 수치가 증가하였다. 이러한 결과가 나타나는 이유는 앞서 설명한 발전 회사들의 수요 자원을 포함한 전략과 수요 반응 참여자의 전략이 쿠르노 균형에 의해 결정되는 것에서 기인 한다. 즉, 동시 게임에서 발전 회사들은 수요 반응 참여자의 보수 함수를 알고 있고, 그를 고려하여 전략을 짜기 때문에 과점 상황에서의 발전량보다 더 낮은 수준의 균형점으로 유도하게 된다. 이러한 상황에서 수요 자원을 가진 참여자는 수요 반응에 아예 참여하지 않는다고 해서 그들의 이윤을 최대화할 수 없기 때문에, 어쩔 수 없이 참여하게 되면서 자신의 이윤을 손해 볼 수 밖에 없다. 이에 반해, 일반참여소비자들의 경우, 수요 반응에 의한 가격 하락 효과를 누리게 되어 발전 과점 상황에서의 잉여보다 증가한 잉여의 값을 누릴 수 있게 된다. 이로 인하여 소비자 잉여에서 더 많은 비중을 차지하는

일반참여소비자라는 설정 하에 전체 CSDI 는 감소함을 확인할 수 있다.

이제 적정 인센티브 사전 공표를 포함한 시나리오에서의 *CSDI* 를 확인하여 보자. 해당 지수의 값은  $-0.289$ 로서 일반 과점 상황 시나리오, 수요반응 참여 상황 시나리오에 비하여 더 작아졌음을 알 수 있다. 이는 과점 상황에서의 소비자 잉여와 비교하여 그 수치가 증가하여 얻어진 결과이며, 발전 회사로 부당하게 이전된 후생이 다시 소비자한테로 일부 이동함을 의미한다. 개별 소비자들의 CSDI 를 보면, 수요반응참여 소비자는  $-0.268$ , 일반참여소비자는  $-0.292$ 로서, 자율적 수요 반응 시나리오나 과점 시나리오에 비해 모두 0에 더 가까워졌음을 알 수 있다. 또한, 자율적 수요 반응 참여에 비해 수요반응참여소비자의 CSDI 가 감소하지 않고 증가하였다는 점이다. 이는, 수요 자원을 가진 소비자가 더 이상 자신을 희생시키지 않고, 일반참여소비자와 더불어 상대적으로 완전 경쟁에 가까운 결과를 얻어냈다는 것이다.

하지만, CSDI 들의 수치들은 공통적으로 음의 값을 가지고 있다. 이는 개별 참여자들이 모두 가격 수용자로 행동하는 완전 경쟁과 비교하였을 때, 시장지배력을 완전히 제거하지는 못한다는 것을 의미한다. 완화된 시장지배력으로 인하여 소비자 잉여는 증가하지만, 가격 수용자 수준의 완전 경쟁 결과에까지는 도달할 수 없음을 의미한다.

다음 사례 연구에서는 소비자의 반응성을 변화시켜 가며 인센티브 제공을 통한 수요 반응의 영향에 대해서 살펴보도록 하겠다.



## 5.2. 소비자의 전력에 대한 효용 변화에 따른 시나리오 별 시장 균형 결과

앞선 사례 연구에서는 특정 기울기 수준을 결정해두고, 이에 따른 상황 별 시장 균형에 대해서 연구해 보았다. 이는 소비자의 효용을 정해두고, 그 효과에 대해서 분석한 것이다. 다양한 소비자 효용을 고려하여 사례 분석을 해봄으로써, 본 논문에서 제시하는 분석을 좀더 확장시켜 영향을 살펴볼 필요가 있다. 따라서, 본 절에서는 소비자의 효용을 다르게 설정하고, 그로 인한 시장 균형 분석하고자 한다.

다양한 소비자의 특성을 반영하기 위하여, 본 논문에서는 역수요 함수의 기울기를 변화시켜 가면서 사례 연구를 진행하고자 한다. 기울기를 변화시켜가며 사례 연구를 하는 이유는, 효용이 낮은 소비자들로 이루어진 수요와 효용이 높은 소비자들로 이루어진 수요를 상정하기 위함이다.

역수요 함수 기울기의 범위는  $-0.2$  에서  $-0.7$ 로 구성하였다. 이와 같은 구성의 이유는 상기했던 탄력성 대신 기울기를 지표로 사용한 이유로 설명할 수 있다. 수요의 탄력성 연구에 있어서 초기에 진행되고, 후속 연구들에 많은 영향을 준 [49]에서는 소비자의 탄력성을  $-0.2$ 에서  $-0.7$ 로 산정하였다. 이는 가정용 소비자들에 대한 단기 탄력성에서 장기 탄력성까지를 고려한 수치이다. 다양한 후속 연구들에 있어서 탄력성

연구가 이루어졌으나, 본 논문에서는 상기 참조 논문의 값을 바탕으로 모의를 진행해보겠다. 본 논문에서의 발전 구성 및 역수요 함수의 가정에서 해당 탄력성 범위를 모두 포함할 수 있는 기울기의 범위는  $-0.2$ (탄력성:  $-0.838$ ) 에서  $-0.7$ (탄력성 :  $-0.196$ ) 사이가 되기 때문에 이와 같은 구성으로 모의를 하였다.

각종 지수를 통한 영향 평가에서는 완전 경쟁을 가정한 시나리오(1번시나리오)를 "완전경쟁", 발전사들만이 가격 결정자가 되는 과점 상황(2번시나리오)을 "과점상황", 수요 반응참여자와 발전사들이 가격 결정자가 되는 상황(3번시나리오)을 "자율적수요", 적정인센티브의 사전 공표 효과를 고려한 상황을 "인센티브공표" 이라고 지칭하겠다.

### 5.2.1 기울기 변화에 따른 시장 균형 결과 값에 대한 분석

본 절에서는 각 시나리오 별 결과에 따른 값들을 바탕으로 해당 수치의 변화가 어떠한 의미를 가지는지에 대하여 분석 한다. 먼저, 사회 후생에 대해 어떠한 영향을 미치는 지에 대해 알아보겠다.

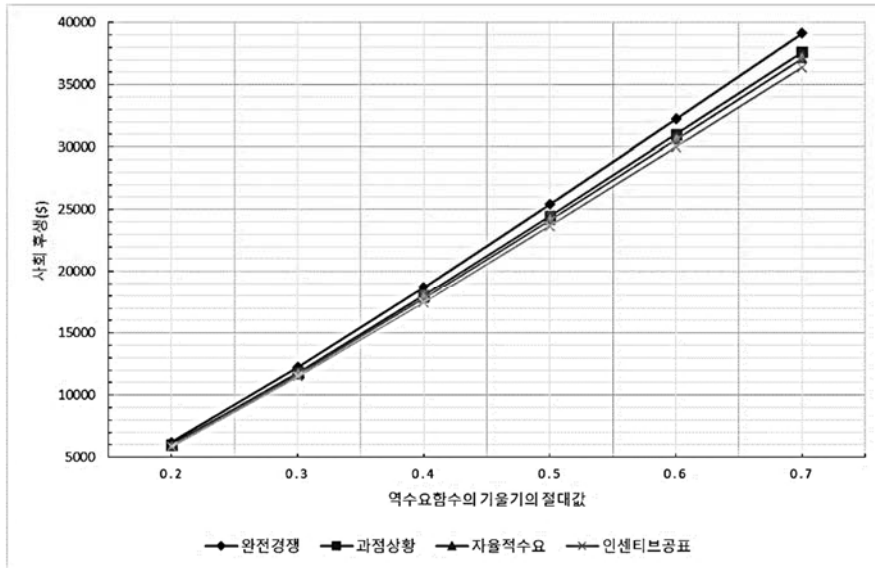


그림 5.1 기울기의 변화에 따른 시나리오 별 사회 후생의 변화

그림 5.1 은 역수요 함수의 기울기 변화에 따른 시나리오 별 사회 후생 값을 나타낸 그래프이다. 완전 경쟁 시나리오를 제외한 다른 시나리오들은 모두 완전 경쟁에서의 값보다 낮은 수치를 가지고 있다. 이는 같은 발전 구성 및 역수요 함수의 기울기 수준을 가지고 있을 때, 완전 경쟁에서의 총 발전량보다 조금이라도 낮은 값을 가지게 되면, 모두 완전 경쟁에서의 후생보다 낮은 값을 보여준다는 의미로도 나타낼 수 있다. 각 기울기 수준에서 과점상황에서의 후생은 완전 경쟁을 제외한 타 시나리오보다 높은 값을 가지고 있으며, 자율적수요 시나리오에서의 후생은 과점상황에서의 후생보다 약간 낮은 수준을 나타내고 있다. 인센티브공표 시나리오는 과점상황에서의 후생보다 낮은 값을 가지고 있다. 전체 후생 면에서 보았을 때는 인센티브공표 시나리오의 후생은

가장 낮은 값으로 나타났다. 이러한 결과가 나타나는 이유를 설명하면, 앞서 모델링에서 언급한 바와 같이 슈타켈버그 균형을 구할 때, 발전 회사들의 최적 반응함수의 결과를 사회 후생 식에 대입하여 다시 최대화하는 과정에서 이를 제약 조건으로 반영하기 때문이다.

또한, 기율기가 급해질 수록 완전 경쟁 시나리오의 후생 값과 타 시나리오들의 차가 커지는 것을 확인할 수 있다. 기율기 수치가 증가하게 될수록 가격 변화에 대해 수요가 둔감해지게 되고, 이러한 역수요 함수를 이용하여 자신의 이윤을 최대화 하는 발전 회사는 발전량을 더 줄이게 된다. 이에 따라 Dead-weight loss는 더 발생하게 되고, 결과적으로 이상적인 상황에 비교하여 후생 값이 더 떨어지게 된다. 여기에 더하여, 수요 반응 량과 인센티브 수준이 포함되면 앞선 해석적인 방법에서 확인한 바와 같이 발전량이 더 줄어 결과적으로 사회 후생이 감소하게 된다.

그 다음으로는, 각 시나리오 별 시장 가격을 살펴보도록 하겠다. 그림 5.2는 시나리오 별 기율기 변화에 따른 시장 가격의 변화를 나타낸 그래프 이다.

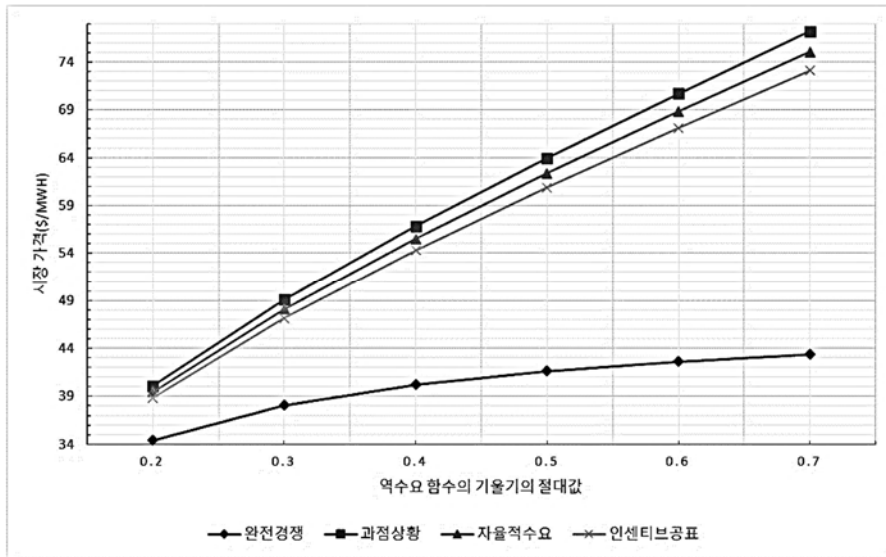


그림 5.2 기율기 변화에 따른 시나리오 별 시장 가격의 변화

먼저, 기율기가 급해짐에 따라서 모든 시나리오에서의 시장 가격은 증가하게 됨을 볼 수 있는데, 이는 최대 수요량이 정해져 있는 상태에서 소비자들이 느끼는 전력에 대한 효용이 높아지기 때문에 나타나는 현상이다. 시나리오 별 시장 가격의 높고 낮음을 살펴보면, 모든 기율기에 대해서 과점상황 > 자율적수요 > 인센티브공표 > 완전경쟁의 순으로 나타남을 볼 수 있다. 즉, 기율기의 변화와 상관없이 가격 결정자들은 시장 가격을 높이는 유인을 제공한다고 할 수 있다. 각 시나리오 별 그래프를 살펴보면, 완전 경쟁의 경우는 가격 증가 폭의 상승속도가 가장 작고, 그 다음이 인센티브 공표 시나리오 일 때로 나타난다. 주목할 점은 인센티브공표 시나리오의 전체 균형 발전량은 가장 낮은 값을 가짐에도 불구하고, 시장 가격이 완전 경쟁을 제외하고 제일 낮다는 점이다. 역수요

함수의 특징을 생각하면, 총 생산량이 많아질수록 가격이 낮아져야 하지만, 수요 반응을 이용하면, 총 발전량이 적음에도 더 낮은 수준의 가격을 유도할 수 있다. 이는, 총 균형발전량과 수요 절감량의 합이 가격에 영향을 미치게 되기 때문인데, 계산해보면, 모든 기율기 수준에서 과점상황의 총 균형발전량이 인센티브공표 시나리오에서의 발전량과 수요 절감량의 합보다 작은 것을 확인할 수 있다. 이러한 연유로 수요 반응은 상대적으로 다른 시나리오들에 비해 적은 총 발전량과 낮은 시장 가격을 이끌어낼 수 있다. 기율기가 급해지면서 인센티브공표 시나리오와 과점 상황 시나리오와의 격차는 증가하게 되는데, 이는 기율기의 변화에 따른 총 발전량의 증가가 인센티브공표 시나리오가 완전 경쟁을 제외하고 제일 적기 때문이다. 완전 경쟁의 경우, 총 발전량을 나타내는 식의 분자에 기율기 요소가 있지 않기 때문에 그 증가 폭이 가장 작다.

다음으로 각 시나리오 별로 소비자 잉여 및 생산자 잉여가 역수요 함수의 기율기에 대하여 어떻게 변하는 지에 대해 서술한다. 먼저, 생산자 잉여에 대하여 분석해보자. 시나리오 별 생산자 잉여의 차이를 좀 더 명확히 알아보기 위해 해당 값에서 완전 경쟁일 때의 생산자 잉여를 뺀 값으로 비교를 시도하였다.

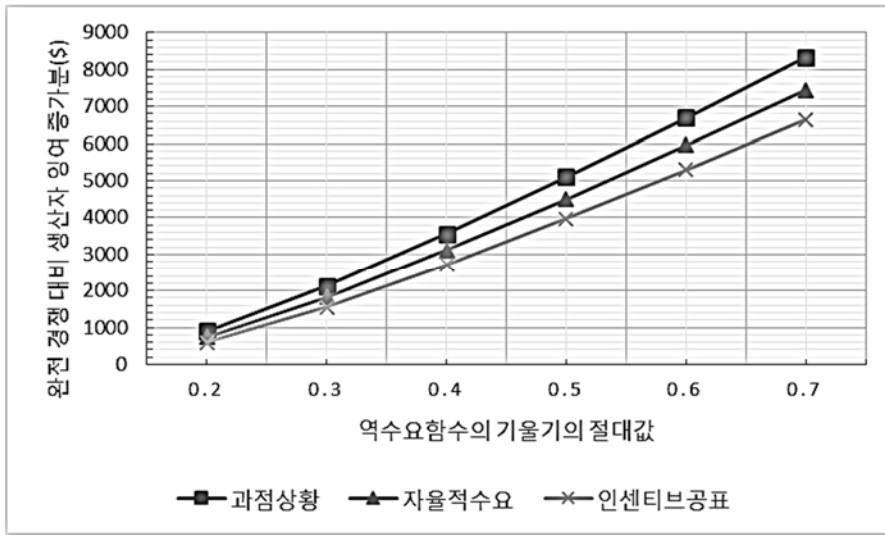


그림 5.3 기울기 변화에 따른 시나리오 별 완전경쟁 대비 생산자 잉여  
증가

그림 5.3은 각 시나리오의 생산자잉여에서 완전 경쟁의 생산자 잉여를 뺀 값을 역수요함수의 기울기 변화에 따라 나타낸 그래프이다. 기울기 전체에서 생산자 잉여의 값은 과점상황 > 자율적수요 > 인센티브공표 순으로 그 크기가 나타났다. 모든 기울기에 대해서 인센티브공표 시나리오가 가장 낮은 생산자 잉여를 제공하게 되는데, 이는 수요 반응을 통한 시장 가격 하락과 그로 인한 총 발전량 감소가 수반 되어 나타나는 결과이다. 기울기가 급해지면서, 잉여 증가분도 커지는 추세는 소비자가 가격에 둔감해질수록 발전 회사들에 의한 시장지배력이 더 큰 수준으로 발휘되는 상황이라고 말할 수 있으며, 수요 반응으로 더 크게 발휘된 시장지배력을 완화할 수 있음을 알 수 있다. 기울기의 절대값이 낮은 수준에서는 소비자가 상대적으로 시장 가격에 민감하기 때문에 용량

철회로 인해 발전 회사가 시장지배력을 행사하는 수준이 상대적으로 낮고, 이에 따라 수요 반응의 편성이 적게 된다. 이 역시 기울기에 따른 총 발전량 수준에 기울기가 미치는 영향이 다름으로 설명할 수 있다. 다음으로 소비자 잉여의 완전경쟁에 대한 감소분을 시나리오 별로 비교하겠다.

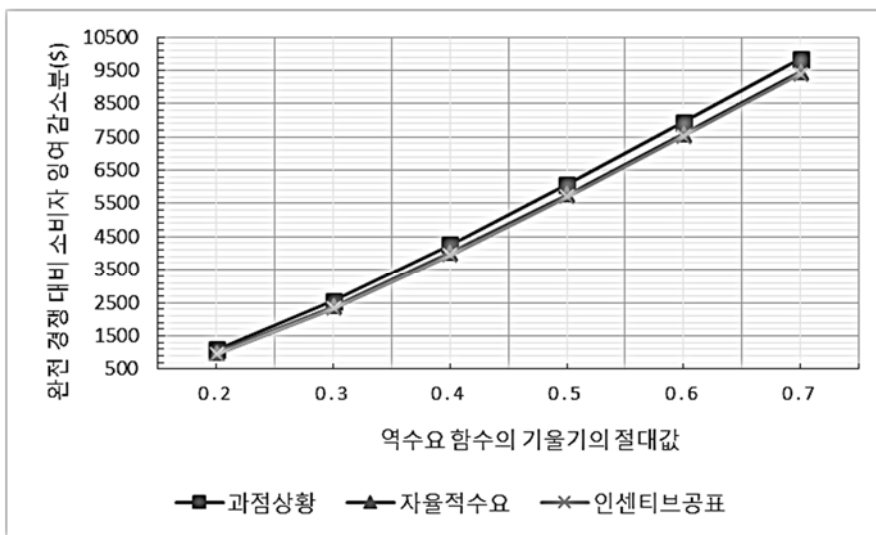


그림 5.4 기울기 변화에 따른 시나리오 별 완전경쟁 대비 소비자 잉여 감소

그림 5.4 는 역수요함수의 기울기 변화에 따른 시나리오 별 소비자잉여를 나타낸 그래프이다. 과점 상황에서의 소비자 잉여 값은 기울기가 급해짐에 따라 그 감소량이 늘어나게 된다. 또한, 과점 상황일 때의 소비자 잉여 감소 수준보다 자율적수요, 인센티브공표 시나리오의 경우의 잉여 감소 수준이 더 작음을 볼 수 있으며, 기울기의 수치가



증가하게 될수록 그 차이는 점점 커짐을 알 수 있다.

상기 그래프에서는 두 가지 사항에 대해서 말할 수 있다. 첫 번째는, 역수요 함수의 기울기가 급해질 수록 가격에 대해 수요가 둔감해지기 때문에 발전 회사의 시장지배력 행사의 정도가 심해지게 되고, 소비자 잉여 감소 분이 증가하게 된다. 두 번째는 수요 반응에 의해서 기울기의 절대값이 큰 케이스에서 잉여 감소 억제량이 더 크게 나타났다고 할 수 있다. 하지만 시장지배력 완화의 정도가 크다고는 말할 수 없으며, 이는 후에 서술할 지표들을 통한 평가로 다루어져야 한다.

다음으로, 자율적 수요 반응 참여 시나리오와 적정 인센티브 사전 공표 시나리오 수요 반응량 및 인센티브 수준에 대해 살펴보도록 하겠다.

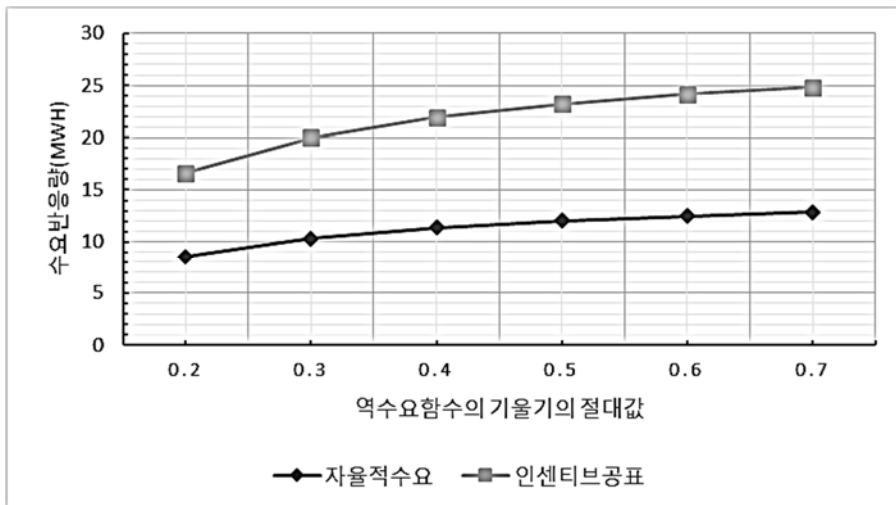


그림 5.5 기울기 변화에 따른 시나리오 별 수요 반응량의 변화

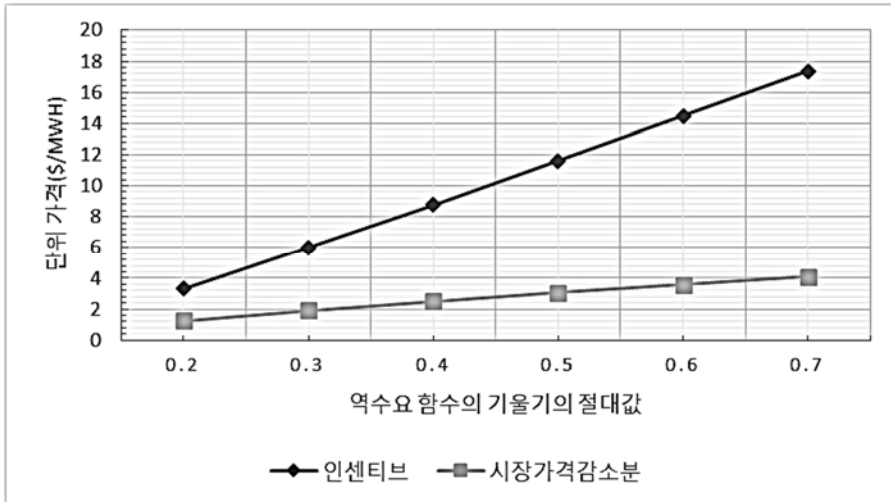


그림 5.6 기울기 변화에 따른 인센티브 사전공표 수요반응의 인센티브 수준 및 시장 가격 감소분의 변화

그림 5.5 는 자율적 수요 반응 포함 시나리오에서의 수요 절감량과 인센티브 사전 공표 시나리오에서의 수요 절감량에 대하여 기울기에 따라 나타낸 그래프이고, 그림 5.6 은 인센티브 사전 공표 시나리오의 각 기울기 별 인센티브 수준과 과점 대비 시장 가격 감소 수준을 나타내는 그래프이다. 모든 기울기 수준에서 인센티브를 제공하는 방법은 자율적 수요 반응에 비해 2배에 가까운 수요 반응량을 보여주었다. 이는 수요반응 참여소비자가 인센티브 제공에 의해 더 많은 수요 반응을 실시하였음을 의미한다. 이를 그림 5.6 의 인센티브 수준과 더불어 설명하면, 수요가 가격에 둔감해지면서 자발적인 수요 반응보다 인센티브에 더 의존하게 된다는 것을 알 수 있다. 또한, 기울기가 급해지면서, 인센티브 사전 공표 인센티브 사전 공표 시나리오와 자율적

수요 반응 상황 시나리오의 수요 반응 량 차이가 점점 증가하게 되는데, 이는 수요가 가격에 둔감해지면서 강화되는 시장지배력 행사 완화에 더 많은 수요 자원이 이용됨을 의미하게 된다.

다음으로 발전 회사들의 과점 대비 인센티브를 사전 공표하는 방법이 어느 정도의 인센티브 수준에서 수요 반응을 하며, 이에 따른 시장 가격의 감소효과는 어떠한지를 분석하겠다. 낮은 크기의 기율기 수준에서는 적은 량의 인센티브를 가지고 적은 수준의 가격 감소를 이끌어냈으나, 기율기의 절대값이 큰 수준에서는 기율기가 완만한 수준에서보다 많은 수준의 인센티브를 제공하여 많은 수준의 가격 감소를 이끌어 내어야 했다. 하지만, 인센티브 수준은 기율기가 급해지면서 큰 폭으로 증가하였고, 시장 가격 감소분은 상대적으로 그 증가 폭이 크지 않았다. 이는 늘어나는 수요 반응 자원들의 전력 사용에 대한 효용이 늘고, 이에 따라 인센티브 수준도 증가하는데 비해, 시장 가격의 감소분은 수요 자원의 절감량과 함께 타 발전기들의 발전량도 가격을 구성하는데 요소가 되기에 발전 회사의 전략행위에 의해 그 감소효과가 떨어진다고 설명할 수 있다. 더 나아가, 단위 시장가격 감소량 당 인센티브의 수준을 생각해보면 기율기가 급해질수록 그 수치는 낮아지는 것을 알 수 있는데, 이는 수요가 둔감해질수록 시장가격 하락을 위한 수요 자원이용에서 더 많은 인센티브를 제공하여야 가능함을 보여주고 있다.

## 5.2.2 시장지배력 측정 지수를 통한 분석

본 절에서는 앞선 5.1절에서 데이터 분석을 위해 사용하였던 지수인 러너지수, PSDI, CSDI 를 이용하여 기율기 변화에 따른 수치들 비교해보고자 한다.

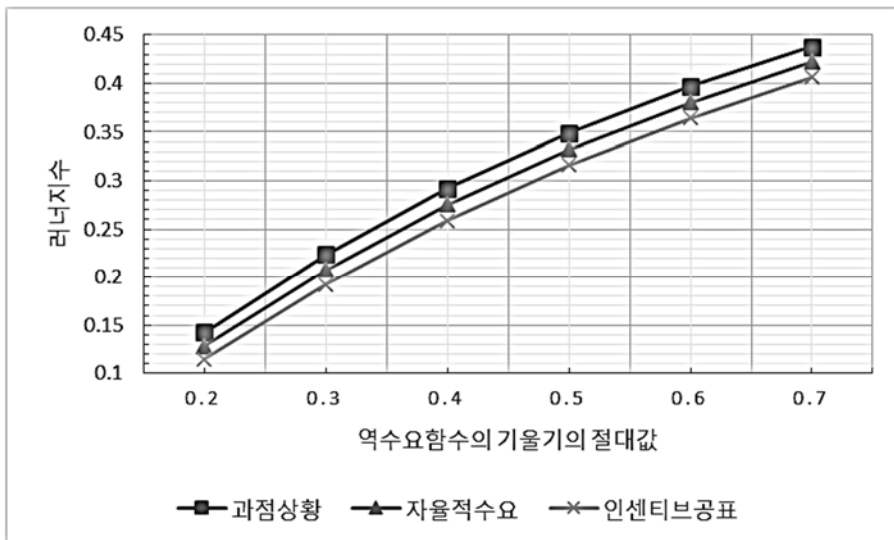


그림 5.7 기율기 변화에 따른 시나리오 별 러너지수

그림 5.7 은 각 시나리오 별 러너지수에 대한 그래프 이다. 모든 시나리오들은 기율기 절대값이 증가하면서 러너지수가 증가하게 된다. 모든 기율기 수준에서 러너지수는 인센티브 사전공표 시나리오에서 가장 낮은 수치를 보여주었다. 이는, 적정 인센티브를 사전공표하는 방법을 이용하는 것이 시장지배력을 완화할 수 있었음을 의미한다. 기율기의

절대값의 증가에 따른 러너 지수의 증가 폭은 거의 비슷하나 같지 않으며, 점차 줄어들게 되는데 각 시나리오 별로 균형 발전량을 결정하는데 있어서, 기울기가 가지는 계수가 다르기 때문이다.

다음으로 각 시나리오 별 CSDI 지수를 통한 시장지배력 행사 정도를 확인하여 보자.

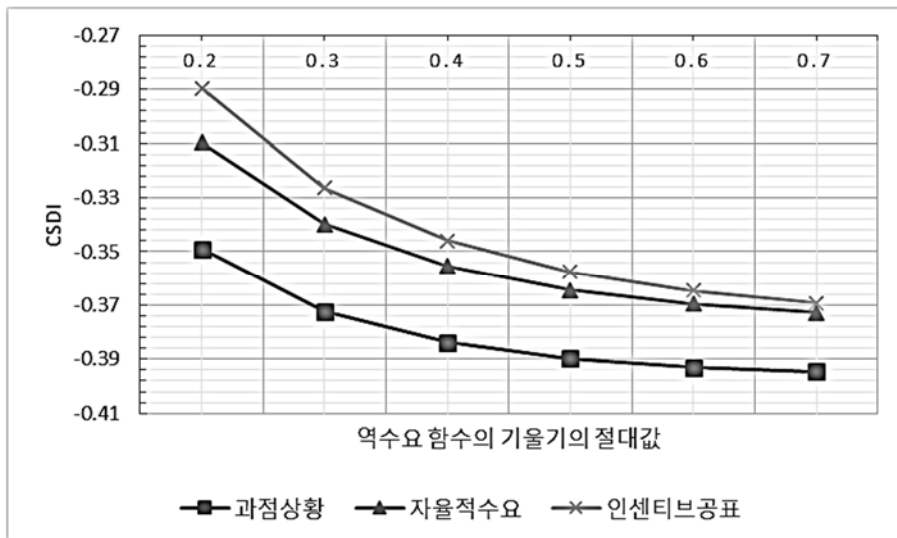


그림 5.8 기울기 변화에 따른 시나리오 별 CSDI

그림 5.8은 CSDI 지수의 역수요 함수 기울기에 따른 값을 시나리오 별로 나타낸 그래프이다. 먼저, CSDI 값들은 모두 음의 값을 가지는 것을 볼 수 있다. 즉, 모든 시나리오들에 대하여 시장지배력 발휘로 인해 소비자 잉여 수치가 감소했음을 알 수 있다. 해당 사례 연구에서는 각 기울기에 대하여 적정 인센티브를 사전공표하는 방법이 과점 상황

시나리오에 비하여 완전 경쟁에 좀더 가까운 수치를 나타내었다. 기울기가 급해지면서 인센티브를 사전 공표하는 시나리오의 CSDI 는 타 시나리오의 값에 비해 큰 폭으로 수치가 감소하는 것을 볼 수 있다.  $-0.7$  기울기에서는 자율적 수요 반응 참여 시나리오와 비슷한 수준의 값을 가지는 것을 볼 수 있는데 이는 자율적 수요 반응 참여로 인하여 얻게 되는 소비자 잉여와 인센티브 제공 수요 반응으로 얻게 되는 소비자 잉여가 거의 같아졌다는 의미이다. 실제로 기울기  $-0.7$ 에서의 소비자 잉여는 자율적 수요 반응 참여의 경우, 수요반응참여자는 2430.813\$, 일반참여소비자는 22919.1\$의 수치를 가졌다. 그런데 인센티브를 사전 공표하는 시나리오의 경우, 수요반응참여소비자는 2584.358\$, 일반참여소비자는 22828.497\$를 나타냈다. 즉, 일반참여소비자의 경우, 가격 하락을 위한 수요 반응의 인센티브 지급이 자신이 얻는 잉여보다 많아진 수준이 된다. 이러한 결과가 나타나는 이유는 기울기가 급해지면서 수요 자원의 가치 또한, 같이 증가하게 됨으로써 나타나는 현상이다.

다음으로, 생산자 잉여 변화에 관련된 지수인 PSDI 의 변화에 대해서 살펴보도록 하자.

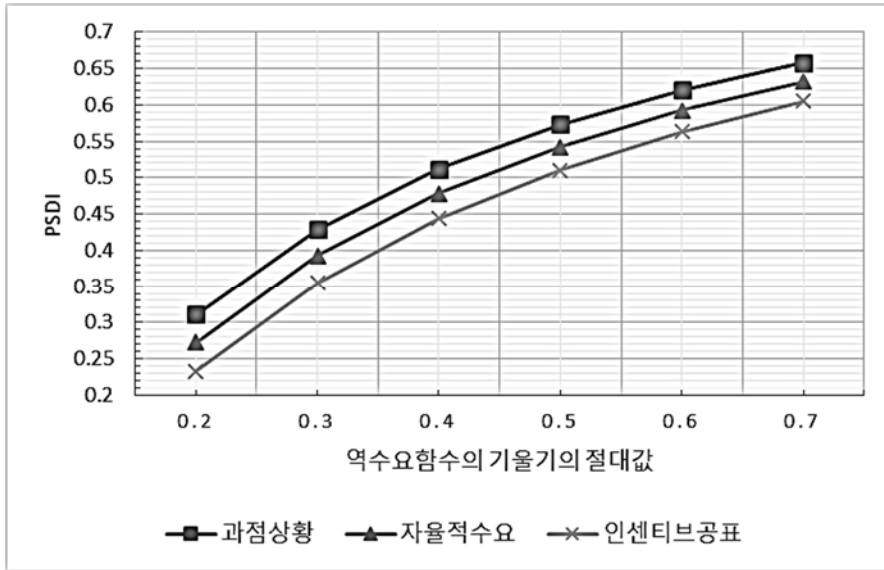


그림 5.9 기울기 변화에 따른 시나리오 별 PSDI

그림 5.9 는 PSDI 지수의 역수요 함수 기울기에 따른 값을 시나리오 별로 나타낸 그래프이다. 기울기가 급해짐에 따라서, 모든 시나리오의 PSDI 는 증가하는 모습을 보여주었다. 인센티브를 사전 공표하는 시나리오인 모든 기울기 수준에서 타 시나리오들보다 좀 더 완전 경쟁에 가까운 값들을 보여 주었다. 이는, 발전 회사들의 용량 철회에 의해 소비자잉여로부터 가져가는 잉여의 양을 줄이고, 시장지배력을 완화시켰다고 할 수 있다. 기울기 수준이 증가함에 따라, 시나리오 별 PSDI 차이는 다소 줄어들게 되었는데, 이는 수요 자원의 효율이 증가하면서, 사회 후생 최대화를 위해 시장 지배력 완화에 이용되는 수요 자원의 억제 능력이 가져다 주는 소비자 잉여 증대능력이 떨어지게 되었음을 나타낸다.

상기한 지수들을 통한 분석은 러너지수에 기반한 지수들을 이용한 분석을 시도한 것이다. 이 지수들은 완전 경쟁에 대한 각각의 소비자 잉여 및 생산자 잉여의 변화수치를 나타낸 것이다. 시장 지배력 완화 여부에 대해서 더 세밀히 알아보기 위해서는 전체 사회 후생에서 시나리오 별로 소비자 잉여와 생산자 잉여가 백분위로 얼마 정도 차지하는 가를 분석해볼 필요성이 있다.

이를 위해, 각 시나리오 별, 사회 후생 대비 소비자잉여 및 생산자 잉여의 비율을 막대그래프를 통해 나타내었다.

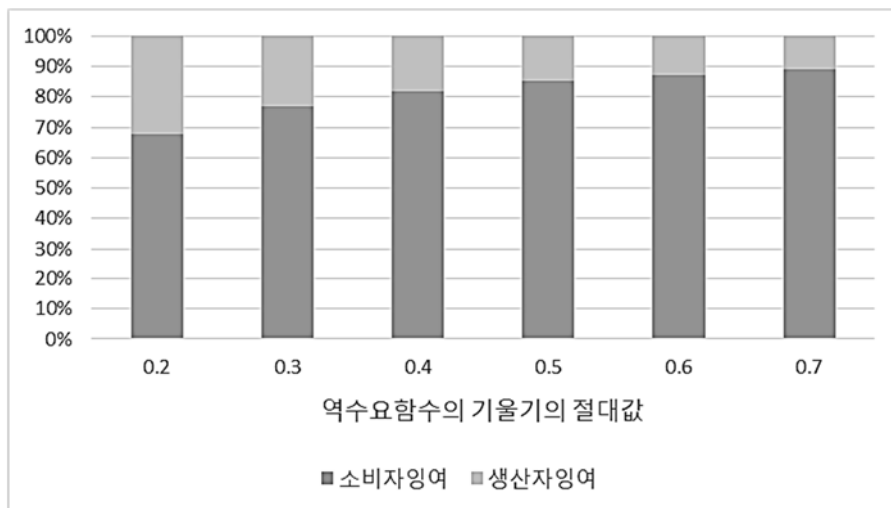


그림 5.10 완전 경쟁 시나리오에서의 소비자 잉여 및 생산자 잉여의  
백분율



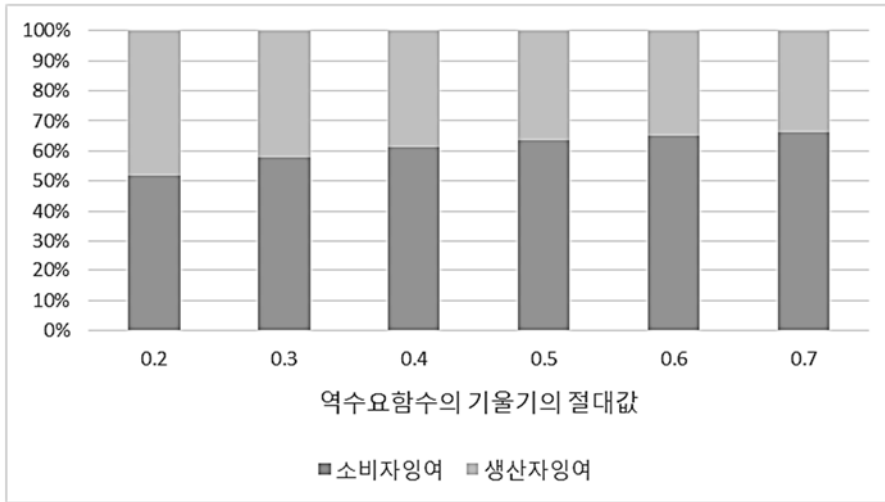


그림 5.11 과점 상황 시나리오에서의 소비자 잉여 및 생산자 잉여의  
백분율

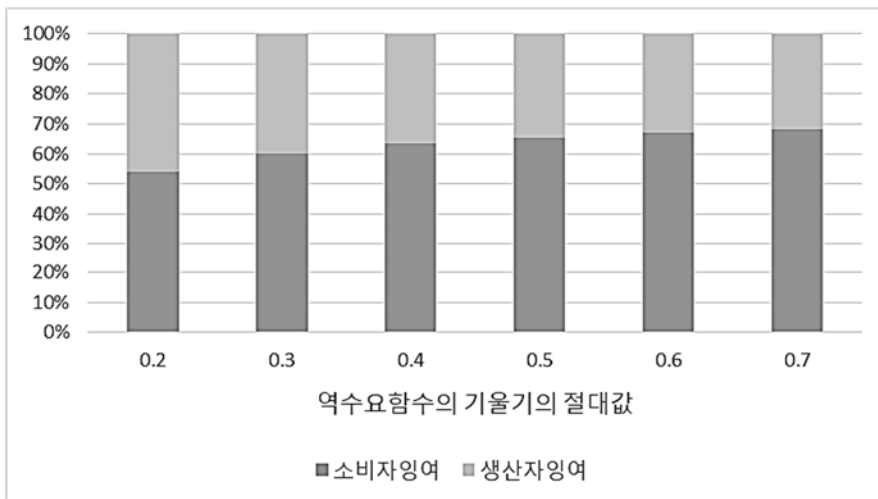


그림 5.12 자율적 수요반응 참여 시나리오에서의 소비자 잉여 및 생산자  
잉여의 백분율

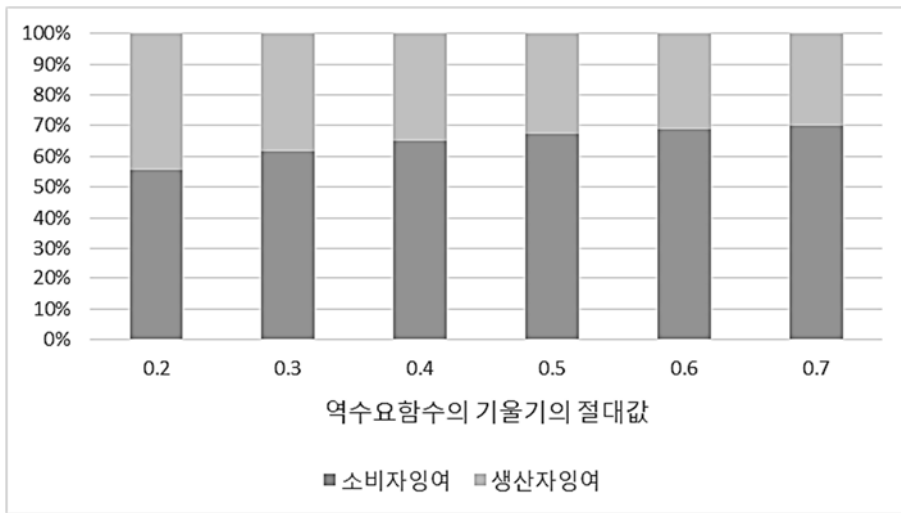


그림 5.13 인센티브 사전공표 시나리오에서 소비자 잉여 및 생산자 잉여의 백분율

그림 5.10~5.13 은 각 시나리오 별로 기울기 변화에 따른 소비자 잉여와 생산자 잉여를 사회 후생을 100%로 환산하였을 때 비중을 나타낸 그래프들 이다. 완전 경쟁 시나리오의 경우, 소비자 잉여가 전체 사회 후생에 대하여 차지하는 비율은 약 67.8% 에서 기울기가 급해짐에 따라 약 88.9%까지 증가하게 된다. 이에 비해 과점 상황 시나리오의 경우, 약 51.9%에서 서서히 증가하여 66.3%까지 증가하게 된다. 즉, 완전 경쟁에서의 잉여 배분이 이상적이라고 가정하였을 때, 시장지배력 행사의 영향 때문에 소비자가 가져가야 할 부분을 생산자가 가져가게 되며, 기울기가 급해질수록(소비자가 가격에 대해 둔감해질수록) 생산자 잉여와 소비자 잉여의 비율 차이는 점점 커지게 된다. 수요 반응을 포함한 상황 시나리오의 경우, 54%에서 68.2% 사이의 소비자 잉여

비율을 보여준다. 이는 과점 상황 시나리오에서의 소비자 잉여 비율에 비해 증가한 수치이다. 주목할 점은 기울기 값이 커질수록 과점 상황의 소비자 잉여 비율과의 차이가 점점 줄어든다는 점이며, 이는 수요 반응에 의해 잃게 되는 효용이 점점 커지기 때문이다. 이제 적정인센티브를 사전 공표 하였을 때의 균형에서의 비율을 살펴보도록 하자. 소비자 잉여의 비율은 약 55.7% 에서 69.8% 까지의 비율을 나타내고 있다. 이는 일반 과점에 비해 기울기  $-0.2$  에서는 3.8%, 기울기  $-0.7$ 에서는 약 3.5%까지 증가한 수치를 보여준다. 이는 수요 반응이 참여하는 상황 시나리오와 마찬가지로 사회 후생 대비 소비자 잉여의 비율이 증가한 것이며, 그만큼 분배에 공정성이 좋아졌다고 말할 수 있다. 또한, 수요 반응이 참여하는 과점 시나리오와 마찬가지로, 기울기가 급해질수록 수요 자원의 가치 증가 때문에 소비자 잉여의 증가 폭이 점점 줄어들게 하여 결과적으로 소비자 잉여 비율의 차이가 낮은 기울기의 절대값을 가진 사례보다 줄어들었음을 볼 수 있다.

### 5.3 실 사례의 적용을 위한 사례 연구

본 논문에서는 인센티브의 사전 공표가 시장 균형에 미치는 영향에 대해서 해석적인 분석과 수치적인 분석을 시도하였다. 결론적으로 적정 인센티브 수준은 시장 가격을 하락 시키고, 과점 균형에서의 잉여 분배보다 상대적으로 좀더 공정한 분배를 유도할 수 있음을 사례를 통해 확인하여 보았다.

하지만, 발전 회사들의 수가 증가한 경우를 수치적으로 분석한 앞선 사례 연구들은 선행 연구들의 발전 회사들의 파라미터, 역수요 함수들을 바탕으로 수행한 결과 이다. 따라서, 가상의 상황을 상정하여 본 논문에서의 분석 기법을 적용한 것이다. 이에 따라, 실제의 상황에서 사용되는 파라미터들을 바탕으로 본 논문에서 분석한 내용에 대한 경향성이 유지되는지 확인하기 위해 추가 사례 연구를 진행하여 보았다.

현재, 우리나라의 전력 시장 체제는 변동비 반영 시장으로서 강제적인 풀의 형태를 가지고 있다. 발전기를 보유한 회사들은 개별 발전기의 비용함수를 전력 거래소에 제출하게 되고, 전력 거래소는 이를 바탕으로 예측된 수요와 함께 가격 결정 발전 계획을 세우게 된다. 또한, 가격 결정 발전 계획 이후, 운영 발전 계획을 추가적으로 수립하여, 실제적인 급전을 준비하게 된다. 가격 결정 발전계획과 실제 운영의 차이는 해당 발전기의 변동비를 반영하여 정산을 하는 구조를 띄고 있다.

이러한 환경 하에서, 본 논문의 방법론을 적용하기 위해서는 1) 가격 결정 발전 계획의 부분이 강제적인 풀 상황에서 자율적인 풀 상황으로 변해야 하며, 2) 개별 발전 회사들의 전체 생산 비용 함수를 알 수 있어야 적용이 가능하다.

국내의 가격 결정발전 계획은 비용 함수를 전력거래소(Korean Power eXchange, KPX)에 직접 제출하고, 이를 바탕으로 발전기 운영 계획을 세우게 된다. 개별 발전 회사들의 비용함수들은 비공개로서 이를 획득하는데 어려움이 있어, 발전 비용 함수들을 통한 개별 발전 회사들의 총 생산 비용 함수를 얻을 수 없는 문제점이 발생 한다. 따라서, 본 논문에서는 [27]의 사례 연구에서 이용하였던 발전 회사의 총 생산비용 함수들을 바탕으로 논문에서 제시한 접근 방법을 적용하여 보았다. 선행 연구에서는 이탈리아 계통에 있는 7개 발전 회사의 총 생산비용함수를 산정해내어, 이를 통해 쿠르노 균형을 알아보는 연구를 진행 한 바, 이를 이용하여, 본 논문에서 분석한 인센티브 사전 공표 효과를 수치적으로 알아보고자 한다. 개별 발전 회사들의 총생산함수는 다음과 같다.

표 5.14 실 사례 연구에 이용된 발전회사들의 생산비용함수 정보

	$c_i$ (\$)	$b_i$ (\$/MW)	$a_i$ (\$/MW <sup>2</sup> )	$P_{\max}$ (MW)	$P_{\min}$ (MW)
발전회사 1	0	12.61	0.00315	8800	0
발전회사 2	0	13.76	0.00315	8700	0
발전회사 3	0	13.92	0.005715	4500	0
발전회사 4	0	17.11	0.00664	3300	0
발전회사 5	0	10.33	0.01077	2000	0
발전회사 6	0	15.65	0.01037	2600	0
발전회사 7	0	14.86	0.01037	5800	0

실제 이탈리아 전력 시장에서 얻어진 시장 가격과 부하에 대한 데이터를 기준으로 단조 감소하는 일차 역수요 함수를 유추하고, 이를 바탕으로 자발적 수요 반응의 효과와 인센티브 사전 공표 효과를 알아보았다. 본 논문에서 상정한 4가지 시나리오, 1) 완전 경쟁 시나리오 2) 과점 상황 시나리오 3) 자율적 수요 반응 참여 시나리오 4) 인센티브 사전 공표 시나리오를 바탕으로 시뮬레이션을 수행하였다. 각 시뮬레이션들에서 사용된 역 수요 함수는 이탈리아 시장에서의 실측 시장 가격과 발전량을 바탕으로, 1차 함수를 가정하여 유추해내어 구성하였다. 각 시나리오 별 시장 균형 결과는 다음과 같이 나타났다. 논문에서의 reference price 와 quantity 는 85.42\$/MWh 에 44450MW 의 값으로서, 외부에서 수입하는 전력 6000MW 와 수력 발전량인 14000MW 를 합한 값이다. 이를 바탕으로 잔여 역수요 함수를 통해 시장 가격을 도출하였다. 각각의 시뮬레이션에서는 기준 탄력성을 각각

-0.8, -0.5, -0.3, -0.1 으로 설정하였을 때, 시장 균형과 그 결과에 대해 나타낸 값들이다.

표 5.15 기준 탄력성이 -0.8 일 때의 시장 균형 결과

	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4
Market price(\$/MWh)	43.806	61.342	59.666	58.104
Social welfare(\$)	1.8411E+6	1.8069E+6	1.7865E+6	1.7543E+6
Consumer surplus(\$)	1.5323E+6	1.1919E+6	1.2143E+6	1.2205E+6
Supplier surplus(\$)	3.0874E+5	6.1498E+5	5.7225E+5	5.3382E+5
Lerner index	0	0.286	0.266	0.246
PSDI	0	0.498	0.46	0.422
CSDI	0	-0.286	-0.262	-0.255
Total Quantity (MWh)	20631.178	18195.589	17550.866	16950.268
DR Quantity (MWh)	-	-	877.543	1695.027
Incentive level(\$/MWh)	-	-	-	12.204

- 잔여 역수요 함수:  $P(Q) = 192.3054 - 0.0072Q$

표 5.16 기준 탄력성이 -0.5 일 때의 시장 균형 결과

	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4
Market price(\$/MWh)	45.718	71.265	69.16	67.204
Social welfare(\$)	2.6628E+6	2.6104E+6	2.5794E+6	2.5307E+6
Consumer surplus(\$)	2.3133E+6	1.7865E+6	1.8149E+6	1.8194E+6
Supplier surplus(\$)	3.4945E+5	8.2396E+5	7.6451E+5	7.1128E+5
Lerner index	0	0.358	0.339	0.32
PSDI	0	0.576	0.543	0.509
CSDI	0	-0.295	-0.275	-0.271
Total Quantity (MWh)	21953.149	19291.95	18582.159	17922.744
DR Quantity (MWh)	-	-	929.108	1792.274
Incentive	-	-	-	17.206

- 잔여 역수요 함수:  $P(Q) = 256.468 - 0.0096Q$

표 5.17 기준 탄력성이 -0.3 일 때의 시장 균형 결과

	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4
Market price(\$/MWh)	47.637	87.721	84.908	82.303
Social welfare(\$)	4.1596E+6	4.0746E+6	4.0236E+6	3.9442E+6
Consumer surplus(\$)	3.7667E+6	2.8914E+6	2.9289E+6	2.9285E+6
Supplier surplus(\$)	3.9286E+5	1.1832E+6	1.0947E+6	1.0157E+6
Lerner index	0	0.457	0.439	0.421
PSDI	0	0.668	0.641	0.613
CSDI	0	-0.303	-0.286	-0.286
Total quantity (MWh)	23280.322	20396.623	19618.043	18896.718
DR Quantity (MWh)	-	-	980.902	1889.672
Incentive level(\$/MWh)	-	-	-	26.266

- 잔여 역수요 함수:  $P(Q) = 371.2337 - 0.0139Q$

표 5.18 기준 탄력성이 -0.1 일 때의 시장 균형 결과

	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4
Market price(\$/MWh)	50.542	162.130	156.166	150.664
Social welfare(\$)	1.1655E+7	1.1423E+7	1.1269E+7	1.1032E+7
Consumer surplus(\$)	1.1192E+7	8.5477E+6	8.6210E+6	8.5848E+6
Supplier surplus(\$)	4.6340E+5	2.8749E+6	2.6480E+6	2.4470E+6
Lerner index	0	0.688	0.676	0.665
PSDI	0	0.839	0.825	0.811
CSDI	0	-0.309	-0.298	-0.304
Total quantity (MWh)	25288.937	22100.715	21210.587	20389.383
DR Quantity (MWh)	-	-	1060.529	2038.938
Incentive level(\$/MWh)	-	-	-	71.363

- 잔여 역수요 함수:  $P(Q) = 935.65 - 0.035Q$

기준 탄력성 -0.1 의 경우, 일본 전력 수요에서의 예측된 탄력성



수치를 반영하여 사례 연구를 해본 결과이다<sup>3</sup>. 상기 시뮬레이션들의 결과와 같이 인센티브를 공표하는 수요 반응 반영 시나리오의 시장 가격은 완전 경쟁 시나리오를 제외한 타 시나리오보다 가장 낮은 값을 나타내는 것을 알 수 있다. 사회 후생은 인센티브를 사전에 공표하는 시나리오가 가장 낮은 값을 가지게 되고, 생산자 잉여는 과점 상황인 2번 시나리오보다 낮아지게 되며, 소비자잉여는 증가하여 좀더 완전 경쟁에 가까운 모습을 보여주고 있다. 이는 본 논문에서 연구한 사례에서 분석한 바와 같이, 인센티브의 사전 공표 과정이 시장 참여자들로 하여금 전략 행위를 수정하게 하는 것과, 수요 절감에 의해 잃게 되는 효용에 의하여 얻어지는 결과라고 할 수 있다.

상기 시뮬레이션에서의 결과들을 살펴보면, 본 논문에서 시도한 분석 방법과 그 결과에 대해서 그 경향성이 유지됨을 알 수 있었다. 즉, 인센티브를 사전 공표하는 수요 반응은 시장 가격을 과점 상황과 비교하여 하락 시키는 결과를 가져오고, 소비자 잉여의 증대, 생산자 잉여의 감소를 유도하나, 그들의 전체 사회 후생은 감소할 수 있음을 알 수 있었다. 또한, 러너지수, PSDI, CSDI 지수들을 비교하였을 때, 과점과 비교하여 상대적으로 완화된 시장지배력을 확인할 수 있었다.

---

<sup>3</sup> 일본의 수요 탄력성은 Tsutomu Oyama 교수의 견해로서 실제와 다를 수도 있다.

## 제 6 장 결론

전 세계적으로 전력 산업으로의 시장 체제가 도입되면서, 소비자의 반응성이 주목 받고 있다. 특히, 수요 반응을 위한 인프라 구축이 확대되어 가면서 수요 측의 정확한 잉여 반영을 위해, 소비자들이 전력 시장의 운영에 미치는 영향 분석 및 이용 방안에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 하지만, 과점 상황으로 인한 공급 측의 시장지배력 보유와 그 행사에 있어 전력 산업 내에서의 견제 수단이 부족하여 불공정한 잉여의 분배 가능성이 존재한다.

이에 본 논문에서는 전력 시장의 도입과 더불어 나타날 수 있는 참여자들의 전략 행위에 대한 대책 방안으로 인센티브 기반 수요 반응 방식을 이용해 시장지배력 완화 방안에 대하여 연구하였다. 발전 회사들이 가지고 있는 시장지배력으로 인하여 사회 후생을 분배하는데 있어서 과점 상황은 발전 회사에게 치우친 분배를 이끌어낼 수 있기 때문에, 수요 반응이 가지고 있는 시장 균형점 결정에 대한 영향력을 이용하여 발전 회사들의 전략행동을 제한하는 방법으로 잉여의 공정한 분배를 이루는 시도를 하였다.

그 방법으로, 수요 반응의 도입으로 인하여 얻을 수 있는 시장 가격 변화 및 발전 회사의 전략 변화를 정식화 하고 이를 제약으로 고려하여 인센티브를 사전에 공표하는 방식의 수요 반응 적용하였을 때의 시장 균형을 유도하는 법에 대해 알아보았다.

인센티브 기반 수요 반응은 사전 계약된 수요 자원들을 이용하여 운영주체가 자원 이용의 필요를 느낄 때, 공표된 보상 수준을 지급하고 수요를 절감하는 프로그램을 지칭하는데, 본 논문에서는 수요 자원을 가진 참여자들의 전략 행동까지 고려하여 시장 균형에 대해 분석하였다. 수요 반응의 효과 분석은 소비자가 가지고 있는 부하의 크기나 부하의 효용에 대하여 상이해질 수 있기 때문에 수요반응참여소비자와 일반참여소비자는 그들의 잉여를 일정 비율로 나누어 가지고 있다는 가정과 수요 자원은 수요 반응 참여자가 가지고 있는 부하 중 효용이 가장 작은 부하들로 구성되어 있다는 가정을 통해 분석의 일관성을 부여하였다.

이를 바탕으로 참여자들의 이윤최대화를 고려한 시장 균형을 구하기 위해 후행 경기자인 발전 회사들과 수요반응참여소비자들이 참여하는 쿠르노 게임의 균형을 구하였고, 선행 전략을 정하는 운영자가 상기 제약을 바탕으로 사회 후생을 최대화 하는 인센티브 수준을 결정하는 문제를 순차 게임을 통해 풀어 수요반응 량 및 총 균형발전량 등을 구하였다. 모델링을 통한 해석적인 분석은 두 개의 발전 회사와 수요반응참여 소비자, 일반참여소비자가 존재할 때의 상황으로 하였다. 해석적인 분석의 결과로서, 시장지배력 완화를 위해 인센티브를 사전에 공표하는 방법은 발전 회사들의 균형발전량을 감소시키고, 수요 반응 참여자의 수요절감량을 늘리는 결과를 가져오게 되며, 시장 균형 가격을 감소시켰다. 이러한 결과는 소비자잉여의 부분적 수복 및 과도하였던 생산자 잉여의 감소를 유도한다. 또한,

수요반응참여 소비자들의 잉여를 보전하여 참여의 유인을 제공하게 된다.

다수의 발전 회사가 고려될 때에는 해석적인 방식의 분석이 매우 어렵기 때문에 시뮬레이션을 통한 사례 연구를 통해 확인하였다. 사례 연구의 결과로 다음과 같은 사실들을 확인할 수 있었다.

▶ 발전 회사들은 그들이 가진 시장지배력으로, 낮은 비용을 가지는 발전 회사는 발전량을 감소시키고 높은 비용을 가지는 발전 회사는 발전량을 늘리는 방식으로 행사하며, 이는 시장 가격 하락 및 소비자잉여의 생산자잉여로의 이전을 발생시킨다.

▶ 전일 에너지 시장에서 수요반응참여소비자의 자율적인 참여를 유도하게 되면, 해당 참여자는 과점에 비해 그들이 얻게 되는 잉여가 감소할 수 있다. 그들이 전일 시장에 참여하는 것만으로도 발전 회사의 전략은 변화하게 되며, 그들의 수요 감축량이 없더라도 발전 회사는 수정된 입찰전략을 사용하기 때문에 수요 반응 참여 소비자는 손해를 봄에도 불구하고 수요를 절감하는 행위를 한다.

▶ 과점 상황에 비교하여 인센티브를 사전 공표하는 방법은 러너 지수, Producer surplus deviation index, Consumer surplus deviation index 등의 수치가 상대적으로 0에 가까워짐을 보여주었다. 이는 발전 회사가 행사하는 시장지배력의 수준이 상대적으로 감소하였음을 보여준다.

▶ 역수요 함수의 기울기가 급해지면서, 발전 회사들은 시장 지배력의 행사를 강화하게 되고, 수요 자원들을 가지고 있는 소비자들은 전력에 대해

더 많은 효용을 느끼게 되어, 이에 따라 지급해야 되는 인센티브 수준 및 수요 자원 이용량은 급격히 늘어나게 된다. 시장 가격 감소 효과나 소비자 잉여의 증대는 그 양이 늘었으나, 시장지배력 완화 수준은 줄어들었음을 지수를 통한 분석으로 알 수 있다.

▶ 적정 인센티브를 사전에 공표하는 방법은 전체 사회 후생 값에 있어서 과점 상황에 비교하여 다소 감소된 수치를 보여주나, 소비자 잉여의 증가 및 발전 회사 잉여 감소의 결과를 가져와 완전 경쟁에 좀더 가까운 잉여 비율 구성을 유도하였다.

현실에서의 소비자들은 전력 가격에 대해 매우 비탄력적인 모습을 보여주며, 역수요 함수를 구성하는데 있어서도 전력에 대해 매우 높은 효용을 보여주는 소비자도 존재하게 된다. 수요 반응은 소비자들이 전력에 대해 느끼는 효용을 도매 전력 시장에 반영할 수 있는 기회를 제공하게 된다. AMI가 완전히 구축된 상황에서도 발전 회사들의 확보 용량에 의한 과점이 존재할 수 있기 때문에 이러한 수요 반응의 시장지배력 완화에 대한 관심은 증가할 것이다. 본 논문에서 살펴본 시장지배력 행사 완화를 위한 적정 인센티브를 사전 공표하는 수요 반응의 이용 방안은 전력 산업 구조 및 전력 시장 체제가 가지고 있는 전통적인 문제인 발전 회사의 전략 행동에 대해 대응하여 좀더 공정한 분배를 유도할 수 있다는 장점이 있다.

## 본 논문의 한계점

1. 본 논문에서의 탄력적인 역 수요 함수는 개별 소비자들의 효용을 모두 반영한 것으로서, 향후 AMI 가 확산되어 개별 소비자들이 인프라를 모두 가지고 있을 때를 기반으로 논의를 전개하였다. 그 결과, 발전 측 시장지배력 행사를 막기 위한 수요 반응의 인센티브 제공은 언제나 사회 후생을 감소시키는 결과를 가져오게 되었다. 비록, 시장 가격을 하락시키고 잉여의 분배에 있어서 상대적으로 좀더 공정성을 가질 수 있지만, 제일의 목적인 사회 후생의 최대화를 고려하였을 때에는 본 논문이 제시한 수요 반응은 한계를 가질 수 밖에 없다.

2. 본 논문에서 했던 가정들을 바탕으로 전개 하였던 논의들은 실제의 상황을 반영하기 힘든 특성들을 가지고 있다. 소비자들의 잉여를 일정 비율로 나눈다는 가정이나, 수요 자원 이용 시, 낙찰된 부하 중에 가장 낮은 효용을 가진 부하들로 고려하는 가정 등은 현실에 본 이론을 바로 적용하는 데에는 무리가 있을 것으로 판단한다.

3. 본 논문에서의 인센티브 결정의 주체는 시장 운영자로 결정되어 있고, 규제적인 측면에서 수요 반응을 이용하도록 고려하고 논의를 진행하였다. 하지만, 현실에서의 수요 반응은 Curtailment service provider나 Load serving entity 와 같은 사업자들이 그 주체가 되어 소비자들의 수요 반응 프로그램을 운영하게 된다. 그 이유는, 도매 시장 가격과 소매 시장 가격 차이에 의해

발생할 수 있는 전력 판매 회사의 손해를 보전할 수 있도록 함이다. 하지만, 본 논문에서는 전력 판매 회사의 이윤을 고려하지 않고, 실시간 요금이 그대로 소비자들에게 전가되는 상황을 고려하였다. 더욱이, 소비자들에게 AMI 가 광범위하게 보급된 상황까지 가정하였다고 가정하였다. 이에 시장의 운영자 입장에서 어떻게 하면 좀 더 공정성을 갖춘 시장의 운영을 할 수 있을까라는 고민 하에 본 논의를 진행하였다. 향후, 추가 연구 진행에 있어서는 소비자와 전력 판매회사 사이의 관계를 고려하여 인센티브 책정 주체를 정하고, 분석을 해야 될 것이라고 판단한다.

## 참고 문헌

- [1] K. Le, R. Boyle, M. Hunter, and K. Jones, "A procedure for coordinating direct-load-control strategies to minimize system production costs," *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, pp. 1843-1849, 1983.
- [2] J. Chen, F. N. Lee, A. M. Breipohl, and R. Adapa, "Scheduling direct load control to minimize system operation cost," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 10, pp. 1994-2001, 1995.
- [3] G. Strbac, "Demand side management: Benefits and challenges," *Energy policy*, vol. 36, pp. 4419-4426, 2008.
- [4] P. Palensky and D. Dietrich, "Demand side management: Demand response, intelligent energy systems, and smart loads," *Industrial Informatics, IEEE Transactions on*, vol. 7, pp. 381-388, 2011.
- [5] J. W. Zamikau, "Demand participation in the restructured Electric Reliability Council of Texas market," *Energy*, vol. 35, pp. 1536-1543, 2010.
- [6] P. Centolella, "The integration of price responsive demand into regional transmission organization (RTO) wholesale power markets and system operations," *Energy*, vol. 35, pp. 1568-1574, 2010.
- [7] "Benefits of Demand Response in Electricity Markets and Recommendations for Achieving Them," US Department of Energy, Report to the United States Congress 2006.
- [8] M. H. Albadi and E. El-Saadany, "A summary of demand response in electricity markets," *Electric Power Systems Research*, vol. 78, pp. 1989-1996, 2008.



- [9] G. Strbac, E. Farmer, and B. Cory, "Framework for the incorporation of demand-side in a competitive electricity market," *IEEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, vol. 143, pp. 232-237, 1996.
- [10] M. P. Moghaddam, A. Abdollahi, and M. Rashidinejad, "Flexible demand response programs modeling in competitive electricity markets," *Applied Energy*, vol. 88, pp. 3257-3269, 2011.
- [11] D. S. Kirschen, G. Strbac, P. Cumperayot, and D. de Paiva Mendes, "Factoring the elasticity of demand in electricity prices," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 15, pp. 612-617, 2000.
- [12] H. Aalami, M. P. Moghaddam, and G. Yousefi, "Modeling and prioritizing demand response programs in power markets," *Electric Power Systems Research*, vol. 80, pp. 426-435, 2010.
- [13] H. Aalami, G. Yousefi, and M. P. Moghaddam, "Demand response model considering EDRP and TOU programs," in *Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2008. T&D 2008. IEEE/PES*, 2008, pp. 1-6.
- [14] H. Zhong, L. Xie, and Q. Xia, "Coupon incentive-based demand response: Theory and case study," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 28, pp. 1266-1276, 2013.
- [15] A. J. Conejo, J. M. Morales, and L. Baringo, "Real-time demand response model," *Smart Grid, IEEE Transactions on*, vol. 1, pp. 236-242, 2010.
- [16] K. Spees and L. B. Lave, "Demand response and electricity market efficiency," *The Electricity Journal*, vol. 20, pp. 69-85, 2007.
- [17] A. K. David and F. Wen, "Market power in electricity supply," *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol. 16, pp. 352-360, 2001.

- [18] J. F. Wilson, "Scarcity, market power, and price caps in wholesale electric power markets," *The Electricity Journal*, vol. 13, pp. 33-46, 2000.
- [19] X. Guan, Y.-C. Ho, and D. L. Pepyne, "Gaming and price spikes in electric power markets," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 16, pp. 402-408, 2001.
- [20] P. Joskow and E. Kahn, "A quantitative analysis of pricing behavior in California's wholesale electricity market during summer 2000," in *Power Engineering Society Summer Meeting, 2001*, 2001, pp. 392-394.
- [21] R. J. Green, "Did English generators play Cournot? Capacity withholding in the electricity pool," 2004.
- [22] B. Allaz and J.-L. Vila, "Cournot competition, forward markets and efficiency," *Journal of Economic theory*, vol. 59, pp. 1-16, 1993.
- [23] E. Centeno, J. Reneses, and J. Barquin, "Strategic analysis of electricity markets under uncertainty: A conjectured-price-response approach," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 22, pp. 423-432, 2007.
- [24] R. Baldick, R. Grant, and E. Kahn, "Theory and application of linear supply function equilibrium in electricity markets," *Journal of Regulatory Economics*, vol. 25, pp. 143-167, 2004.
- [25] T. Ackermann, "Distributed resources and re-regulated electricity markets," *Electric Power Systems Research*, vol. 77, pp. 1148-1159, 2007.
- [26] E. Bompard, Y. Ma, R. Napoli, and G. Abrate, "The demand elasticity impacts on the strategic bidding behavior of the electricity producers," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 22, pp. 188-197, 2007.

- [27] E. Bompard, Y. Ma, R. Napoli, G. Abrate, and E. Ragazzi, "The impacts of price responsiveness on strategic equilibrium in competitive electricity markets," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 29, pp. 397-407, 2007.
- [28] C.-L. Su and D. Kirschen, "Quantifying the effect of demand response on electricity markets," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 24, pp. 1199-1207, 2009.
- [29] R. Aazami, K. Aflaki, and M. R. Haghifam, "A demand response based solution for LMP management in power markets," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 33, pp. 1125-1132, 2011.
- [30] M. A. A. Pedrasa, T. D. Spooner, and I. F. MacGill, "Scheduling of demand side resources using binary particle swarm optimization," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 24, pp. 1173-1181, 2009.
- [31] S. Ghosh, J. Kalagnanam, D. Katz, M. Squillante, X. Zhang, and E. Feinberg, "Incentive design for lowest cost aggregate energy demand reduction," in *Smart Grid Communications (SmartGridComm), 2010 first IEEE international conference on*, 2010, pp. 519-524.
- [32] S. Maharjan, Q. Zhu, Y. Zhang, S. Gjessing, and T. Basar, "Dependable demand response management in the smart grid: A stackelberg game approach," *Smart Grid, IEEE Transactions on*, vol. 4, pp. 120-132, 2013.
- [33] Z. Yu, F. Sparrow, T. Morin, and G. Nderitu, "A stackelberg price leadership model with application to deregulated electricity markets," in *Power Engineering Society Winter Meeting, 2000. IEEE*, 2000, pp. 1814-1819.

- [34] B. F. Hobbs, C. B. Metzler, and J.-S. Pang, "Strategic gaming analysis for electric power systems: An MPEC approach," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 15, pp. 638-645, 2000.
- [35] E. Nekouei, T. Alpcan, and D. Chattopadhyay, "A game-theoretic analysis of demand response in electricity markets," in *PES General Meeting/ Conference & Exposition, 2014 IEEE*, 2014, pp. 1-5.
- [36] E. Bompard, R. Napoli, and B. Wan, "The effect of the programs for demand response incentives in competitive electricity markets," *European Transactions on Electrical Power*, vol. 19, pp. 127-139, 2009.
- [37] F. A. Wolak, *Market design and price behavior in restructured electricity markets: an international comparison*. Springer, 2000.
- [38] A. K. Srivastava, S. Kamalasadan, D. Patel, S. Sankar, and K. S. Al-Olimat, "Electricity markets: an overview and comparative study," *International Journal of Energy Sector Management*, vol. 5, pp. 169-200, 2011.
- [39] W. W. Hogan, "On an "Energy only" electricity market design for resource adequacy," *V Work (ing paper, Center for Business and Government, Harvard University, September*, 2005.
- [40] L. A. Barroso, T. H. Cavalcanti, P. Giesbertz, and K. Purchala, "Classification of electricity market models worldwide," in *CIGRE/IEEE PES, 2005. International Symposium*, 2005, pp. 9-16.
- [41] A. K. David and F. Wen, "Strategic bidding in competitive electricity markets: a literature survey," in *Power Engineering Society Summer Meeting, 2000. IEEE*, 2000, pp. 2168-2173.

- [42] 유태현, 허재행, 권현규, 박현곤, and 박종근, "수요자원 이용 횟수를 고려한 DR 프로그램 운영주체의 비용 최소화 모델링," *대한전기학회 학술대회 논문집*, pp. 592-593, 2011.
- [43] P. Cappers, C. Goldman, and D. Kathan, "Demand response in US electricity markets: Empirical evidence," *Energy*, vol. 35, pp. 1526-1535, 2010.
- [44] T. H. Yoo, H. Park, J.-K. Lyu, and J.-K. Park, "Determining the Interruptible Load with Strategic Behavior in a Competitive Electricity Market," *Energies*, vol. 8, pp. 257-277, 2014.
- [45] 한동근, "게임이론 전략적 의사결정의 이론과 응용, 경문사," 1997.
- [46] S. Borenstein, J. Bushnell, and C. R. Knittel, "Market power in electricity markets: beyond concentration measures," *The Energy Journal*, pp. 65-88, 1999.
- [47] F. Müsgens, "Market power in the German wholesale electricity market," EWI Working paper 2004.
- [48] D. Newbery, "Predicting market power in wholesale electricity markets," 2009.
- [49] D. R. Bohi and M. B. Zimmerman, "An update on econometric studies of energy demand behavior," *Annual Review of Energy*, vol. 9, pp. 105-154, 1984.
- [50] 문승일. (2013) 계통연계형 대용량 에너지 저장장치(ESS)의 활용방안 및 경제성 평가. 44-48. Available: <http://www.dbpia.co.kr/Article/3258630>
- [51] L. Huang, J. Walrand, and K. Ramchandran, "Optimal demand response with energy storage management," in *Smart Grid Communications (SmartGridComm), 2012 IEEE Third International Conference on*, 2012, pp. 61-66.

## APPENDIX

### A. 1 본 논문에서 나타난 사회 후생 감소에 대한 분석

본 논문에서는 수요 반응의 이용에 의해 시장 참여자들이 전략 행동을 하여 사회 후생이 감소하는 결과를 나타내었다. 하지만, 이러한 결과가 나타나게 되는 이유는, 가격에 반응하는 부하들이 전력 시장에 전부 반영되었을 때를 기본으로 분석을 한 결과이다.

현재 전력 시장에서 많은 소비자들은 도매시장 가격과 무관하게 한 값으로 고정되거나 시간대별로 미리 정해진 전기요금을 적용 받고 있다. 이러한 소비자들은 시시각각 변하는 전력 도매시장 가격에 노출되지 않으므로, 가격에 따라 소비량이 변하지 않고, 결과적으로 가격 탄력성이 존재하지 않는 소비 패턴을 보인다.

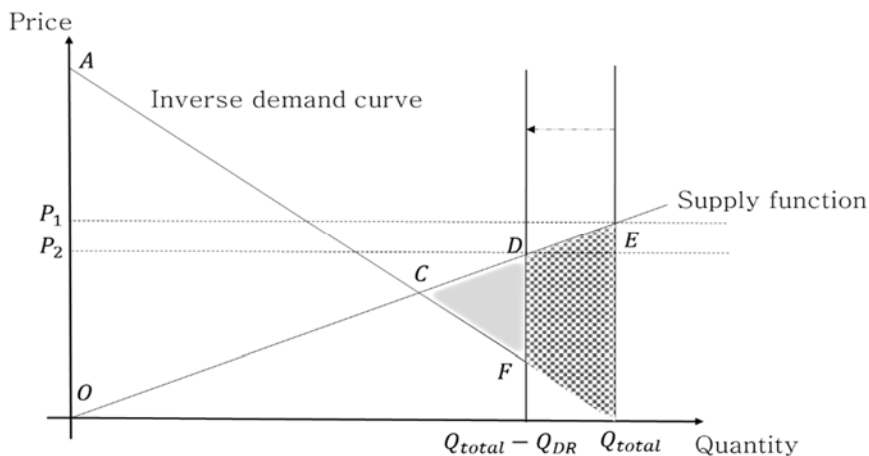


그림 A.1 현실에서의 비탄력적 수요 곡선과 수요 반응에 의한 후생 증가

그림A.1 은 현실에서의 비탄력적 수요 곡선과 수요 반응에 의한 후생 증가를 나타낸 그래프이다. 만약 비탄력적 수요 곡선이  $Q = Q_{total}$  로 나타난다면, 시장 가격은  $P_1$  로 결정되어, 전체 사회 후생은  $AOC - ECQ_{total}$  로 결정된다. 여기에서  $Q_{DR}$  만큼의 수요 반응이 이루어진다면, 시장 가격은  $P_2$  로 결정되어, 사회 후생이  $AOC - CDF$  로 결정된다. 이는 수요 반응 이전보다  $DEQ_{total} F$  만큼의 잉여가 증가하게 된다.

상기한 바와 같이, 수요 반응은 현실에서 사회 후생을 증가시킬 수 있는 하나의 도구로 사용될 수 있다. 하지만, 본 논문에서는 AMI 가 확산되고, 소비자들이 자신의 의사를 전력 시장에 반영할 수 있다는 전제를 바탕으로 논의를 전개하였다. 따라서, 발전 회사들이 가격 결정자로 행동하여 시장 균형 가격에 영향을 주지 않는 이상, 사회 후생은 최대를 이룰 수 있게 된다. 하지만, 본 논문에서는 이러한 상황에서도 발전 회사들이 가격 결정자로 행동하여 시장 가격을 왜곡하는 행위의 방지에 초점을 두고, 발전 회사들의 시장지배력 행사를 완화하고자 향후, 가격 결정자로 행동할 수 있는 수요 반응 참여자들을 상정하고 이들을 이용해 인센티브를 사전 공표하는 수요 반응을 적용하고, 그 효과를 알아보고자 하였다. 이에 따라, 본 논문의 사례 연구에서 확인할 수 있었던 사회 후생 감소 효과가 나타나게 되었다.

이렇게 특정한 목적을 위해 사용되는 인센티브 수요 반응(예를 들어 예비력 저하 시 이용하게 되는 Direct Load Control, 시장 가격이 높게

형성되어 이를 낮추기 위해 인센티브를 제공하여 수요를 절감시키는 Economic Load Response Program)은 비용적인 면에서는 효율성을 가질 수 있으나, 사회 후생의 감소로 이어지게 될 것이다. 일부의 사회 후생을 희생하고, 가격하락과 잉여의 재분배를 노리는 이런 방법은 정책적인 관점에서 접근하여야 한다고 생각한다. 만약, 후생의 희생 수준과 적정 가격 절감 사이의 관계를 나타낼 수 있는 정확한 식이 존재한다면, 본 논문에서 구한 적정 인센티브 수준의 옳고 그름을 확인할 수 있을 것이다.

결론적으로, 논문에서 적용하였던 실제 내재효용함수를 적용하지 않고, 현재와 같이 수요를 비탄력적인 것으로 간주하여, 발전 회사의 시장지배력을 완화하기 위해 수요 자원을 이용하는 방법을 사용하게 된다면, 시장 가격의 하락과 함께 사중 손실을 줄일 수 있게 되어 전체 사회 후생의 상승을 가져올 것으로 예측한다. 이러한 연구들은 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

## A.2 ESS(Energy Storage System) 및 보조발전기의 연계 고려

에너지저장시스템(Energy Storage System, ESS)이란 생산된 전력을 저장하였다가 피크 시간에 공급하여 전력피크를 관리하는 시스템으로 전력 사용의 효율을 높이고, 신재생에너지 보급에 따른 불규칙한



전력공급을 보완할 수 있는 시스템이다[50]. 지금까지의 배터리 충방전 알고리즘은 기본적으로 에너지 생산 비용이 저렴할 때 충전을 하고, 생산비용이 높은 시간대에 방전해서 그 차이만큼 편익을 얻도록 하는 구조를 가지고 있다. 다음은 수요 반응과 신재생 에너지, 그리고 에너지 저장장치가 포함된 Home Energy Management System 을 모식화 한 그림이다[51].

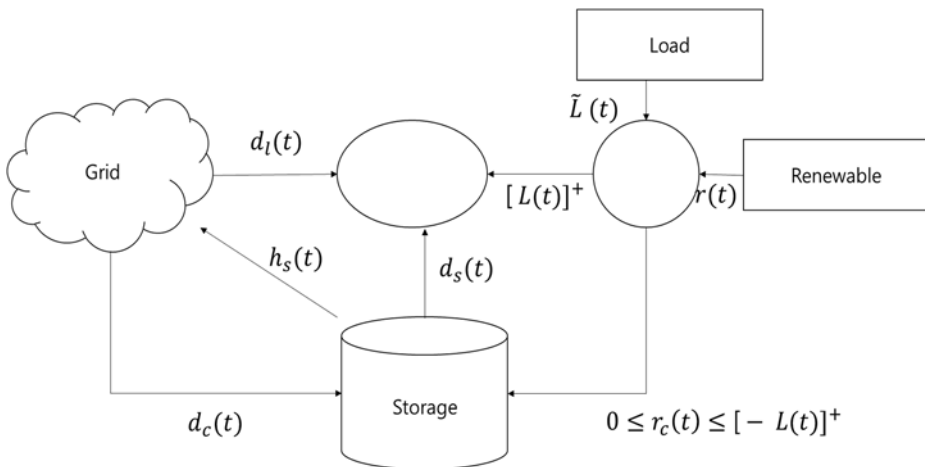


그림 A.2 Grid, 에너지저장장치, 부하, 그리고 신재생에너지 사이의  
관계도[51]

$\tilde{L}(t)$ : 시간  $t$  에서의 사용자의 부하

$L(t)$ : 시간  $t$  에서의 전체부하에서 신재생 에너지 공급을 뺀 나머지 부하

$r(t)$ : 시간  $t$  에서의 사용가능한 신재생 에너지

$d_l(t)$  : 시간  $t$  에서 Grid 로부터 부하가 구입하는 전력

$d_c(t)$  : 시간  $t$  에서 Grid 로부터 ESS가 구입하는 전력

$d_s(t)$  : 시간  $t$  에서 ESS 가 부하에 공급하는 전력

$h_s(t)$  : 시간  $t$  에서 Grid 로 ESS가 판매하는 전력

$r_c(t)$  : 시간  $t$  에서 ESS가 신재생 발전으로부터 충전하는 전력

ESS 의 경우, Grid 로부터 전력 가격이 낮을 때, 또는 신재생 에너지가 부하에 전력을 공급하고 남은 양이 있을 때 충전을 시작한다. 수요는 Grid 로부터 전력을 구입하거나, 신재생 에너지를 이용하거나, 에너지 저장장치를 통해 전력을 공급받는다. 이러한 구성에서 소비자는 수요 자원 프로그램에 참여하여 자신이 계약한 절감량을 줄이거나 시장 입찰을 통하여 발전 회사와 가격 경쟁을 할 수도 있다. 실제로는 수요 절감을 약속하면서, 에너지 저장장치를 통해 사전에 충전해 둔 전력을 바탕으로 스스로의 수요를 충당하는 방법으로 수요 반응을 수행할 수 있을 것이다. 보조 발전기의 이용도 에너지 저장 장치와 유사하게 수요 절감에 의해서 잃게 되는 효용을 보존하는데 도움을 줄 것이다. 예를 들어, 보조발전기의 업무가 필요하지 않은 야간 시간대에 이를 이용하여

에너지를 충전하고, 수요 반응이 필요한 시간대에 수요 절감 지시에 반응하면서, 잃게 되는 효용을 보존할 수 있을 것이다. 본 논문에서는 단순화한 문제를 통해 해석적인 해를 구하는데 초점을 맞추어 논의를 진행하였다. 만약 소비자가 에너지 저장 장치를 보유한 채로 수요 반응에 참여하게 된다면, 에너지 저장 장치의 충방전 알고리즘을 고려하여 소비자의 이윤함수를 구하여 그들의 전략행위를 분석하는 추가적인 연구가 필요할 것으로 예상된다.

### A.3 본 분석 방법 적용에서의 전력 수요 자원 재화와 일반 재화의 차이성

전력 수요 반응의 특징은 재화 사용량의 감소를 위해 인센티브를 제공한다는 점에서 기타 재화와는 다른 특성을 가진다. 만약, 정책적인 목적에서 특정 재화를 사용하지 않음으로써 인센티브를 제공하는 형태를 동일하게 가진 재화가 존재한다면, 본 논문의 분석 방식을 이용할 수 있을 것이다.

그리고, 일반 재화를 상대로 한, 슈타켈버그 모형을 이용한 시장 균형 도출 방법론에 있어서 비슷한 사례가 존재한다. 동적 완비정보 게임에서의 정부보조금 지급 문제(전략적 무역정책)가 그 것이다.[45]

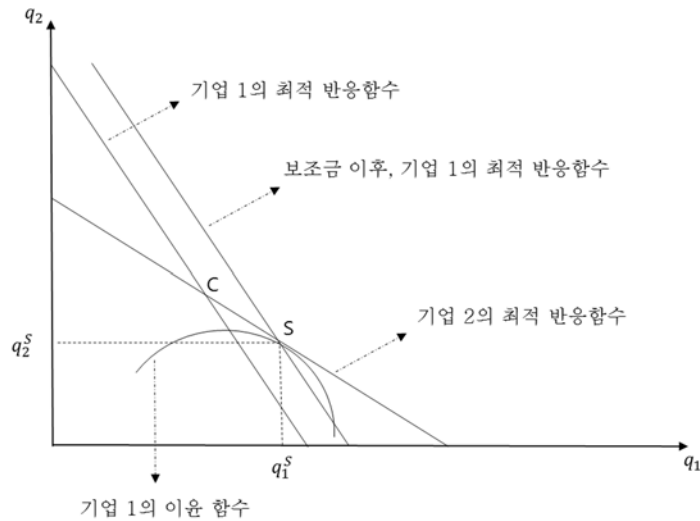


그림 A.3 생산 보조금과 반응곡선의 이동[45]

목표 기업에게 제공하는 정부보조금은 최적 반응 곡선을 쿠르노 균형에서 오른쪽으로 이동시킨다. 적정 수준의 보조금 지급은 기업 1의 최적 반응 곡선이 S에 달하게 만들 수 있다. 이로 인하여 생산량이 늘게 되어 기업1의 이윤을 증가시킬 수 있다.

수요 자원의 이용이 타 재화에 비교하여 다른 점들은 다음과 같이 분석할 수 있다.

1) 타 재화와는 다르게 자원을 사용하지 않음에 따라 보조금을 지급하게 된다. (타 재화의 경우, 생산량이 늘게 되고 추가 효용이 발생)

2) 본 논문에서 제시하는 수요 반응의 이용은 그저 하나의 기업의 이윤을 극대화 시키는 인센티브 수준의 결정이 아닌 사회 후생의 최대화를 목적으로 한 인센티브를 결정하고, 이를 사전 통보하여 시장지배력을 완화시키려는 목적을 가지고 있다.

따라서, 본 논문에서의 수요 반응 이용 방안은 기타 재화들에 비하여 감소하는 수요량을 반영하여야 하기 때문에 전력 시장에서의 특수한 재화 이용이라고 할 수 있다.

#### A.4 수요 반응 참여 소비자 잉여 비율 ( $k$ )의 변화에 따른 시장 지배력 완화 효과

본 논문에서는 발전 회사들의 전략 행동에 의한 과점 상황을 모델링하고, 수요반응참여소비자도 역시 가격 결정자로서 수요 자원을 입찰할 때의 시장 균형의 변화에 대하여 살펴보았다. 또한, 발전 회사쪽으로 치우친 잉여의 분배 상황을 개선하기 위해 수요 반응 효과에서 착안한, 시장지배력 완화를 위한 인센티브 사전 제공 방법론을 모델링하고, 다양한 수요의 가격 민감도를 통한 분석을 시도하였다.

논문의 가정에서는 부하의 용량에 따른 구분을 하지 않고, 그들의 잉여 수준으로 소비자를 구분하여 분석을 시도하였다. 그 이유는 다양한 용량 구성에 따른 분석의 변화를 막기 위함으로써, 수요반응참여소비자의 잉여 비율을  $k$ , 일반참여소비자의 잉여 비율을  $1 - k$  로 두고 모델링을 전개하였다.

이러한 가정에서, 과연 수요반응참여소비자가 전체 잉여에서 차지하는 비율의 변화에 따라, 시장 균형과 시장지배력 완화에 어떠한 효과를

가지는 지에 대해 알아볼 필요가 있다.

하지만,  $k$ 의 변화에 대해 해석적 분석을 통해 균형 결과에 대한 대수적 분석을 위해서는  $I^*$ 를 구해내어야 하며, 이는 매우 복잡한 형태의 식을 가지게 된다. 본 부록에서는 이에 따라 시뮬레이션을 통해 얻어지는 시장 균형 결과에 대해서 간단한 분석만을 소개하도록 하겠다. 향후의 추가 연구에서는  $k$ 값의 변화에 따른 시장가격, 소비자 잉여, 생산자 잉여 및 사회 후생을 대수적으로 분석하여 결과에 대한 해석을 하는 작업이 필요로 할 것으로 보인다.

본 사례 연구에서는  $k$ 의 값을 0.02에서 0.1까지 0.02씩 증가시키며 구해지게 되는 시장 균형 결과를 시장지배력 측정 지수를 통해 알아보도록 하겠다.  $k$ 값 설정의 의미는 수요 자원이 전체 잉여에서 차지하는 비율이 2%에서 10%까지 변화할 때를 의미한다.

먼저,  $k$ 값의 변화에 따른 러너 지수의 변화를 살펴보도록 하자.

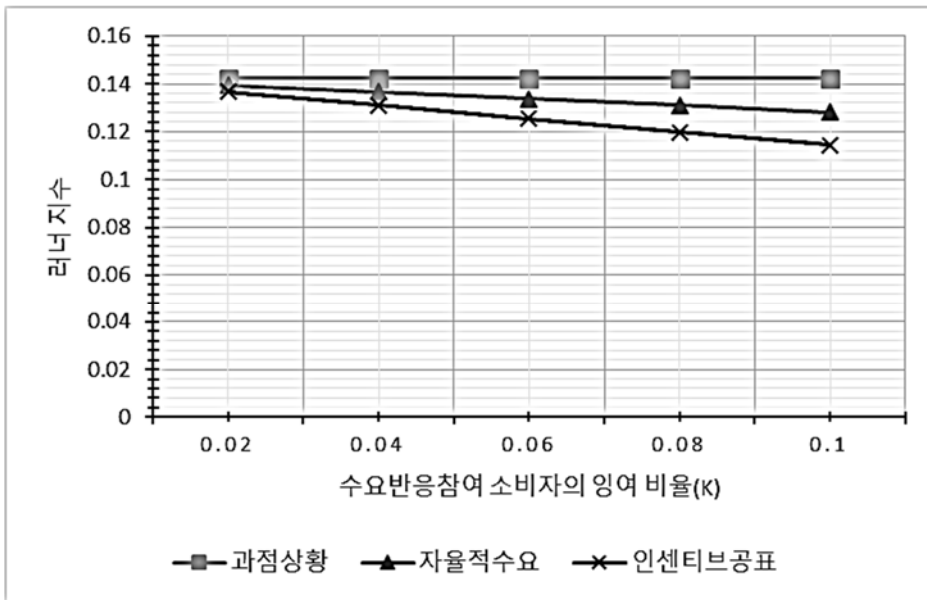


그림 A.4.1 수요반응참여 소비자의 잉여 비율 변화에 따른 러너 지수의 변화

과점 상황의 그래프는  $k$  값의 변화에 상관없이 일정한 값을 보여주고 있고, 그 다음으로, 자율적수요가 낮은 값을 보여주고 있다. 또한, 인센티브를 사전공표하는 방법을 이용하였을 때, 러너 지수는 가장 낮은 값을 보여주고 있다. 먼저, 과점 상황에서의 러너 지수는 소비자들의 구분이 없고, 이에 따라 모든 소비자가 가격 수용자로 행동하기 때문에 시장 가격을 결정하는 항에  $k$  값이 들어있지 않게 된다. 그러므로,  $k$  값 변화에 관계 없이 같은 값을 가지게 된다. 자율적수요 시나리오의 경우, 과점상황에 비해 낮은 수준의 러너 지수를 보여주는데, 이는 시장 균형 가격 구성에 있어서,  $\frac{-(k+2)f\det A}{\det C}$  항에  $k$  값이 변화하게 되면서 시장 균형 가격 또한 이에 따라 영향을 받기 때문으로 유추해볼 수 있다.

인센티브를 사전 공표하였을 때의 시장 균형 가격은 추가된 인센티브 포함 항에 의해  $k$  값이 증가함에 따라 더 낮은 러너 지수를 보여준다. 이는, 수요반응참여소비자들이 자신의 잉여가 전체에서 차지하는 비율이 증가하게 될수록 이윤 최대화를 위한 수요 반응 자원을 더 많이 편성한다는 뜻이며, 그로 인해 시장지배력 완화 효과가 더 많이 나타남을 알 수 있다.

다음으로, 수요반응참여소비자의 잉여 비율 변화에 따른 PSDI의 변화에 대해 살펴보도록 하자.

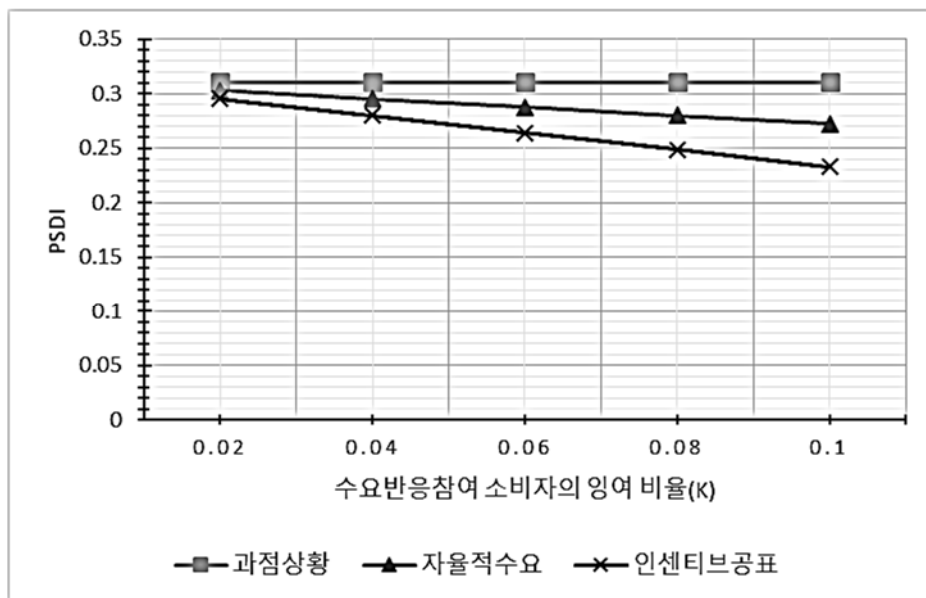


그림 A.4.2 수요반응참여소비자의 잉여 비율 변화에 따른 PSDI의 변화



그림 A.4.2 는 수요반응참여소비자의 잉여 비율 변화에 따른 PSDI 변화를 나타낸 그래프 이다. 과점 상황에서의 결과는 러너 지수에서의 그래프의 형태와 같이  $k$  값에 영향을 받지 않는 과점 상황에서의 발전 전략으로 인해 전 구간에서 동일한 값을 유지하게 된다. 자율적수요 및 인센티브 공표 시나리오의 그래프를 살펴보게 되면,  $k$  값이 증가함에 따라 PSDI가 더욱 감소하게 된다. 이는, 수요반응참여소비자의 전략에 있어 수요 반응 편성 량이 더 증가하게 되어, 시장 가격과 발전 회사들의 총 발전량이 낮아지게 되면서 생산자 잉여가 과점에 비하여 줄어들게 되는 것에 기인한다. 또한, 인센티브의 제공으로 인하여 수요 자원 편성량이 더욱 늘기 때문에 자율적수요 시나리오에서 보다 완화된 시장지배력을 확인할 수 있다.

마지막으로, 수요반응참여소비자의 잉여 비율 변화에 따른 CSDI의 변화를 살펴보도록 하겠다.

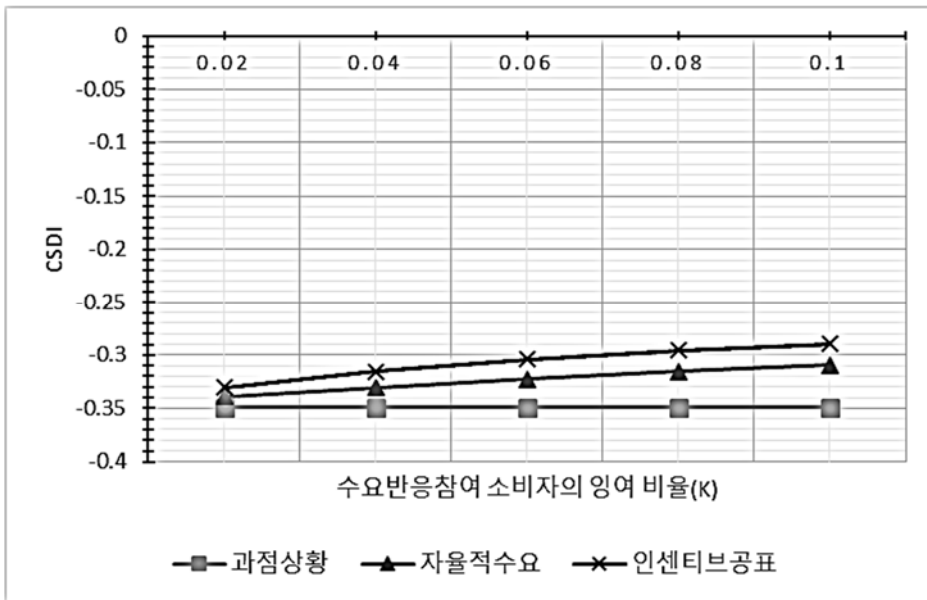


그림 A.4.3 수요반응참여소비자의 잉여 비율 변화에 따른 CSDI 의 변화

그림 A.4.3. 은 수요반응참여소비자의 잉여 비율 변화에 따른 CSDI 의 변화를 나타낸 그래프 이다. 러너지수, PSDI 그래프에서와 마찬가지로, 과점 상황에서의 CSDI는  $k$  값 변화에 영향을 받지 않기 때문에 모든 구간에서 같은 값을 보여준다. 소비자 잉여 부분에 있어서도,  $k$  값의 변화, 즉, 수요반응참여소비자의 전체 잉여에 대한 비중이 늘어날수록 시장 지배력 행사를 완화하는 모습을 보여주고 있다. 상기 그래프에서 확인할 수 있듯이, 인센티브 사전공표를 통한 시장 균형에서의 CSDI 절대값이 가장 작은 수치를 보여주고 있다.

종합하여 말하면, 수요반응참여소비자의 경우, 자신의 수요 절감 행위에 의해서 시장 가격이 하락하고 있음을 알고 있고, 이러한 가격 하락에 의해 추가 이윤을 볼 수 있는 자신의 부하들이 점점 많아지게 됨에 따라

더 많은 수요 반응을 실시하게 된다. 즉, 수요 반응으로 인하여 손실되는 잉여를 일반참여소비자의 잉여증가분으로 얼마만큼 더 수복 할 수 있는가에 수요 반응 량의 결정이 달려있는 것이다. 고로,  $k$  값이 증가할수록 더 많은 수요 반응을 편성하게 된다.

## **Abstract**

# A Study on Market Power Mitigation by Demand Response in Electricity Market

Tae Hyun Yoo

Department of Electrical Engineering,

The Graduate School

Seoul National University

In the last two decades, the electricity industry tries to implement market mechanism to improve the economic efficiency. In the deregulated electricity market, the system operator maximizes social welfare considering supply and demand balance. However, the exercise of market power by capacity withholding of generation companies can be existed because the electricity market can face the oligopoly condition. The exercise of market power can cause various problems, for instance, the rise of market price, unfair surplus

distribution, decrease of social welfare, etc. In this situation, the advance of information and communication technologies makes demand response comes into reality and various researches try to implement demand resource into scheduling problem. One of the important research part is the demand response usage as a market power mitigation tool in electricity market in these days.

In this paper, the method that can mitigate market power exercise by demand response induced by incentive is suggested. The each participant's bid under voluntary pool is analyzed using game-theoretical approach. To analyze behaviors, the profit functions of generation companies, DR consumers and normal consumers are modelled and their best response functions are derived. The market equilibrium in day-ahead energy market in the thesis is obtained by using Cournot game between generation companies and demand response participant. To overcome the shortage of voluntary demand response participation and gain much fairness in market operation, pre-announced demand response program that can make normal consumers as a price-maker in game is suggested. The leader's strategy, incentive level, is determined by market operator to prevent the overuse of demand response. The incentive preannounced DR

method is motivated by the leader's advantage in sequential game and considers the characteristics of other incentive based DR program. The equilibrium of electricity market and appropriate incentive level can be derived by solving the Stackelberg game.

In the simulations, the market equilibrium cases of perfect competition, oligopoly condition, voluntary DR contained condition and incentive preannounced DR contained condition are studied. As a result, the market prices are decreased and much fairer distribution of the surplus is achieved compared to o. It denotes that the market power mitigation is done by using incentive preannounced method.

**Keywords : Cournot Equilibrium, Demand Response, Electricity Market, Market Power, Stackelberg Equilibrium**

**Student Number : 2009–30199**

